G. SOLOMANIUCK

REBOBINAGE DES MOTEURS ASYNCHRONES

CALCULS ET DOCUMENTATIONS

DESOER
ÉDITEUR
LIÈGE

1957

EYROLLES
ÉDITEUR
PARIS

G. SOLOMANIUCK
INGÉNIEUR ÉLECTRICIEN
MEMBRE DE L'A.I.G.
INGÉNIEUR A LA SOCIÉTÉ D'ÉLECTRICITÉ ET DE MÉCANIQUE
(S. E. M.)

REBOBINAGE DES MOTEURS ASYNCHRONES

CALCULS ET DOCUMENTATIONS

DESOER
ÉDITEUR
LIÈGE

1957

EYROLLES
ÉDITEUR
PARIS

INTRODUCTION

L'emploi de moteurs asynchrones se développe de plus en plus grâce à la simplicité de leur conception, leurs prix abordables, la sûreté de marche, la facilité d'entretien et l'excellence de leurs caractéristiques d'exploitation.

L'existence d'un grand nombre de moteurs asynchrones en exploitation fait augmenter en conséquence le nombre de réparations et de modifications nécessitées par des changements de tension ou de fréquences.

Le présent ouvrage est destiné aux techniciens qui sont amenés à rebobiner des moteurs ou à modifier des bobinages et qui désirent trouver sous forme concise et rapide les renseignements nécessaires, les calculs étant réduits au strict minimum.

Bien que la grande majorité des usines, des centrales, des charbonnages aient des services d'entretien outillés pour l'exécution des rebobinages dans leurs ateliers, le nombre de spires par section est souvent défini à l'oeil et la section par essai. Les méthodes de calcul des machines électriques telles qu'elles se présentent dans les ouvrages existants sont destinées, soit aux élèves des écoles techniques supérieures, soit aux calculateurs-spécialistes.

Dans le premier cas elles poursuivent un but pédagogique et dans le second, elles s'adaptent aux conditions particulières de fabrication des usines de constructions électriques.

Le présent ouvrage contient exclusivement des calculs, se rapportant au rebobinage des moteurs asynchrones triphasés en partant d'un circuit magnétique existant.

Ainsi toutes les questions ayant rapport au dimensionnement, au choix de l'alésage, au diamètre extérieur, à la longueur du circuit magnétique ainsi qu'à l'établissement de l'encoche sont omis.

Il est toutefois admis que le lecteur possède des notions d'algèbre et de trigonométrie ainsi que les principes élémentaires du fonctionnement et de la construction des moteurs asynchrones.

Les questions technologiques ne sont mentionnées que lorsqu'elles influencent le calcul.

TABLE DES MATIERES

Pages

Chapitre 1

REBOBINAGE 1

Chapitre 2

PRINCIPE DES MOTEURS ASYNCHRONES 3

Chapitre 3

RELEVE DES DIMENSIONS 10

Chapitre 4

TYPES DE BOBINAGES STATORIQUES 16

Chapitre 5

ENROULEMENTS ROTORIQUES 35

Chapitre 6

SCHEMAS D'ENROULEMENTS 40

Chapitre 7

TABLES D'ENROULEMENTS 48

Chapitre 8

FORCE ELECTRO-MOTRICE DANS UN ENROULEMENT STATORIQUE 59

Chapitre 9

CALCUL DU NOMBRE DE SPIRES 66

Chapitre 10

CALCUL DE LA DIMENSION DES CONDUCTEURS CIRCULAIRES 77

Chapitre 11

CALCUL DES DIMENSIONS DES CONDUCTEURS RECTANGULAIRES 82

Chapitre 12

CALCUL DE LA SPIRE MOYENNE D'UNE SECTION A FILS RONDS 95

Chapitre 13

CALCUL DE LA SPIRE MOYENNE D'UNE SECTION A CONDUCTEURS RECTANGULAIRES 101

Chapitre 14

TRACE DE LA SPIRE MOYENNE D'UNE SECTION STATORIQUE OU ROTORIQUE A BARRES A BASSE TENSION 107

Chapitre 15

CALCUL DU POIDS ET DE LA RESISTANCE D'UN ENROULEMENT 110

Chapitre 16

DEFINITION APPROCHEE DE LA PUISSANCE UTILE 113

Chapitre 17

MOTEURS A DOUBLE POLARITE 133

Chapitre 18

RAPPORT D'ENCOCHES 147

Chapitre 19

FORMULAIRE DE CALCUL 152

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux :		Pages :
1 -	Vitesse synchrone en fonction de la fréquence et de la polarité	5
2 -	Section utile de l'encoche	7
3 -	Isolement des tôles	13
4 -	Nombre d'encoches réalisable	21
5 -	Groupement des bobines	43
6 -	Position des bobines	44
7 -	Enroulements équilibrés pour différents nombres d'encoches	46
8 -	Coefficients de bobinage pour enroulements imbriqués à deux sections par encoche	64
9 -	Coefficients de bobinage pour enroulements concentriques et imbriqués à une section par encoche	65
10 -	Inductions suivant le nombre de spires en série par phase	73
11 -	Inductions suivant le nombre de spires en série par phase	74
12 -	Inductions suivant le nombre de spires en série par phase	75
13 -	Cales d'encoches suivant la puissance	79
14 -	Dimensions des formes de roulage suivant la polarité	97
15 -	Ecartement entre sections	99
16 -	Dimensions des isolants d'encoches de machines ouvertes et fermées	105
17 -	Dimensions des isolants d'encoches de machines entièrement fermées	105
18 -	Isolement des têtes des sections à conducteurs rectangulaires H.T.	106
19 -	Dimensions des chapes	109
20 -	Echauffements suivant C.E.I.	116
21 -	Densité de courant admissible.....	116
22 -	Matières isolantes	117
23 -	Charge linéaire AC	119
24 -	Rendements pour puissance de 0,2 à 10 kVA	121
25 -	Cos φ pour puissance de 0,2 à 10 kVA	122
26 -	Rendements pour puissance de 10 à 1000 kVA	123
27 -	Cos φ pour puissance de 10 à 1000 kVA	124

Tableaux :		Pages :
28 -	Rapports de réduction de puissance suivant type de construction	129
29 -	Rapports de réduction de puissance suivant régimes de fonctionnement	130
30 -	Formulaire de calcul	153
31 -	Spécification de rebobinage	156
32 -	Enroulement statorique concentrique 5200 volts- Classe B	158
33 -	Enroulement statorique à encoches ouvertes. Un conducteur en largeur	159
34 -	Enroulement ondulé jusqu'à 1300 volts (classe B)	160
35 -	Enroulement rotorique jusqu'à 300 volts (classe B)	161

NOMENCLATURE DES SYMBOLES UTILISES

AC - Charge linéaire en A/cm.
B - Induction en gauss.
B_{cr} - Induction dans la culasse rotorique en gauss.
B_{cs} - Induction dans la culasse statorique en gauss.
B_m - Induction maximum dans l'entrefer en gauss.
B_s - Induction dans les dents du stator en gauss.
c_e - Nombre de conducteurs par encoche.
c'_e - Nombre primitif de conducteurs par encoche.
c''_e - Nombre adopté de conducteurs par encoche.
$Cos\varphi$ - Facteur de puissance.
Cp - Nombre de conducteurs en parallèle.
D_a - Diamètre intérieur de tôles statoriques en mm.
D_c - Diamètre sur lequel sont disposés les canaux circulaires en mm.
D_e - Diamètre extérieur de tôles statoriques en mm.
d - Diamètre en mm du fil non isolé.
d_c - Diamètre en cm du canal circulaire de ventilation.
d_i - Diamètre extérieur du fil isolé en mm.
δ_c - Densité de courant en A/mm^2.
E_b - Tension à l'arrêt entre bagues en volts.
$Eeff$ - Valeur efficace de la f.e.m. en volts.
E_l - F.e.m. en ligne en volts.
E'_m - Valeur maximum de la f.e.m. en volts.
Ep - F.é.m. par phase en volts.
E_{pr} - Cote en mm de la fig. 59.
e - Valeur instantanée de la f.e.m. en volts.
e_1 - Jeu entre sections (cote en mm de la fig. 62.)
f - Fréquence en Hz, relevée sur machine à rebobiner.
f'_1 - Nouvelle fréquence après le rebobinage.
f_1 - Coefficient de rebobinage de l'enroulement statorique.
f_2 - Coefficient de bobinage de l'enroulement rotorique.
Φ - Flux en maxwells.
g - Glissement en pour-cent.
Hc - Hauteur de la culasse en cm.
$H'c$ - Hauteur de la culasse plus hauteur de l'encoche en cm.
H_e - Hauteur de l'encoche en cm.
I - Intensité de courant absorbé en ampères.
I_1 - Intensité de courant statorique en ampères.
I_2 - Intensité de courant rotorique en ampères.
k - Coefficient d'utilisation de tôles.
L_c - Longueur corrigée du paquet de tôles en cm.
L_f - Longueur du paquet de tôles avec les canaux compris en cm.
L_n - Longueur nette du paquet de tôles en cm.
l_1 - Largeur maximum de l'encoche en mm.

l_2 - Largeur minimum de l'encoche en mm.
l_m - Largeur moyenne de l'encoche en mm.
l_{can} - Largeur d'un canal transversal.
l_d - Largeur d'une dent à un tiers de la hauteur de la dent en cm.
l'_d - Largeur minimum d'une dent en cm.
l''_d - Largeur maximum d'une dent en cm.
λ - Rapport de transformation avant le rebobinage.
λ' - Rapport de transformation après le rebobinage.
N - Vitesse de rotation asynchrone en tr/min.
No - Vitesse de rotation synchrone en tr/min.
N_1 - Nombre d'encoches statoriques.
N_2 - Nombre d'encoches rotoriques.
n - Nombre entier quelconque.
n_c - Nombre de canaux circulaires.
n_t - Nombre de canaux transversaux.
n_1 - Nombre de spires en série par phase statorique.
n_2 - Nombre de spires en série par phase rotorique.
P - Poids de conducteur nu en kg.
P_g - Poids de conducteur avec son guipage en kg.
p - Nombre de paires de pôles.
q_1 - Nombre d'encoches statoriques par pôle et par phase.
q_2 - Nombre d'encoches rotoriques par pôle et par phase.
r_c - Résistance d'une phase d'un enroulement en cuivre en ohms.
r_a - Résistance d'une phase d'un enroulement en aluminium en ohms.
r_m - Coefficient de remplissage en pour-cent.
r_d - Rendement en pour-cent.
ρ - Coefficient de résistivité en ohm par mm^2/m.
S_e - Section d'entrefer en cm^2.
S_{cs} - Section de la culasse du stator en cm^2.
S_{cr} - Section de la culasse du rotor en cm^2.
S_f - Section d'un fil avec son isolement en mm^2.
S_m - Longueur d'une spire moyenne en mètres.
S_s - Section de dents statoriques sous un pôle en cm^2.
S_r - Section de dents rotoriques sous un pôle en cm^2.
S_u - Section utile de l'encoche en mm^2.
s_c - Section d'un conducteur en mm^2.
τ - Arc polaire en cm.
U - Tension aux bornes du stator en volts.
v - Vitesse linéaire du champ en cm/sec.
W_1 - Puissance du moteur avant la modification en watts.
W_2 - Puissance du moteur après la modification en watts.
W_a - Puissance absorbée en watts.
$Wapp$ - Puissance apparente en kVA.
Wu - Puissance utile en watts.
x - Nombre de circuits en parallèle.
y - Pas d'une section exprimé en nombre de dents.

LISTE DE FORMULES UTILISEES

DESIGNATION	FORMULE	N° DE FORMULE	PAGE
Vitesse synchrone	$N_o = \frac{60 \times f}{p}$	(1)	5
Glissement	$g = \frac{(N_o - N)}{N_o} \times 100$	(2)	6
Diamètre extérieur de tôles statoriques	$D_e = D_a + 2\,H'_c$	(3)	11
Arc polaire	$\tau = \frac{Da \times \pi}{2\,p}$	(4)	11
Longueur corrigée de tôles	$L_c = L_f - l_{can} \times n$	(5)	12
Surface d'entrefer	$S_e = \tau \times L_c$	(6)	12
Longueur nette du fer	$L_n = k\,(L_f - n \times l_{can})$	(7)	13
Section de la culasse sans canaux	$S_{cs} = H_c \times Ln$	(8)	13
Section de la culasse avec canaux	$S_{cs} = (H_c - \frac{2}{3} d_c) \times Ln$	(9)	13
Largeur d'une dent	$l_d = \frac{2\,l'_d + l''_d}{3}$	(10)	15
Section des dents d'un pôle	$S_s = \frac{N_1 \times l_d \times L_n}{2p}$	(11)	15
Nombre d'encoches par pôle et par phase	$q_1 = \frac{N_1}{6p}$	(12)	16
Intensité rotorique	$I_2 = I_1 \times \lambda \times \cos\varphi$	(13)	38
La force électro-motrice efficace	$E_{eff} = 2{,}22 \times f_1 \times n_1 \times \Phi \times 10^{-6}$	(20)	63
Flux	$\Phi = \frac{0{,}97\,U}{4{,}44 \times f_1 \times n_1 \times f \times 10^{-8}}$	(21)	66
Nombre de spires en série par phase	$n_1 = \frac{N_1 \times C_e}{6 \times x}$	(22)	69
Induction dans l'entrefer	$B_m \simeq 1{,}57 \times \frac{\Phi}{S_e}$	(23)	69

DESIGNATION	FORMULE	N° DE FORMULE	PAGE
Induction dans les dents statoriques :	$B_s \simeq 1{,}57 \times \frac{\Phi}{S_s}$	(24)	70
Induction dans la couronne statorique :	$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \times S_{cs}}$	(25)	71
Longueur approximative de la spire moyenne	$Sm = 2\ (Lf + 1{,}4\ \tau + A)$	(27)	99
Poids complet d'un enroulement en cuivre	$P = 26{,}7 \times Cp \times s_c \times S_m \times n_1 \times x \times 10^{-3}$		110
Poids complet d'un enroulement en aluminium	$P = 8{,}1 \times Cp \times s_c \times S_m \times n_1 \times x \times 10^{-3}$		111
Résistance d'une phase à 15°C en cuivre	$r_c = \frac{1}{57} \times \frac{n_1 \times Sm}{s_c \times x \times c_p}$		111
Résistance d'une phase à 15°C en aluminium	$r_a = \frac{1}{34{,}5} \times \frac{n_1 \times Sm}{s_c \times x \times c_p}$		111
Densité du courant dans un conducteur	$\delta_c = \frac{I_1}{s_c \times x \times c_p}$		114
Charge linéaire	$AC = \frac{N_1 \times C_e \times I_1}{\pi \times Da \times x}$	(28)	118
Puissance utile	$W_u = \frac{r_d \times \sqrt{3}\ U\ I_1 \cos \varphi}{100}$	(29)	120
Puissance apparente	$W_{app} = \frac{\sqrt{3}\ U\ I_1}{1000}$	(30)	125

REBOBINAGE

Quels sont donc les cas typiques qui peuvent nécessiter un rebobinage ?

Cas N°1.

L'enroulement statorique est partiellement ou complètement endommagé mais des débris on peut déduire le nombre de spires, le pas et les dimensions du conducteur. Il semblerait à première vue, qu'il n'y a pas lieu d'effectuer de calculs pour reconstituer l'enroulement et pour retrouver les caractéristiques de la plaque signalétique. Mais en pratique, il arrive souvent qu'on ne parvienne pas à remplir l'encoche avec le nombre de spires et les dimensions de conducteurs primitifs.

En effet, il se peut que le conducteur dont on dispose ait un isolement plus épais ou qu'on soit amené à prendre un isolant d'encoche plus épais.

En plus, lors de la fabrication originale, on a utilisé une mise en place mécanique du bobinage.

Finalement il peut arriver qu'on ne dispose pas de conducteur de dimensions nécessaires et qu'on soit obligé de diminuer le nombre de conducteurs par encoche ou de modifier ses dimensions. Pour que ces modifications soient admissibles, il y a lieu d'en contrôler par calcul les conséquences : induction et échauffement.

Cas N°2.

Dans les mêmes conditions que ci-dessus, on demande de modifier l'enroulement pour une nouvelle tension de service, sans changer les autres caractéristiques. La nécessité d'un calcul s'impose. Dans les cas de moteurs de puissance moyenne et à basse tension, ayant un petit nombre de conducteurs par encoche, on pourrait être amené à changer le schéma et même le type d'enroulement.

Cas N°3.

Dans les mêmes conditions que ci-dessus, on demande de rebobiner un moteur pour une nouvelle polarité. Dans ce cas il y a

lieu de recalculer le bobinage pour les nouvelles caractéristiques. La puissance approximative de la machine peut être estimée en partant de la puissance et de la vitesse primitives.

Cas N°4.

Il se peut que l'état de l'enroulement soit tel, qu'on ne parvienne pas à en relever les caractéristiques. Toutefois la plaque signalétique supposée intacte fournira les caractéristiques électriques, qui serviront de point de départ au calcul. Dans ces conditions on s'estimera heureux si on obtient 80 à 85 % de la puissance primitive.

Cas N°5.

C'est le cas le plus difficile : l'état de l'enroulement ne permet pas de reconstituer le bobinage et l'absence de la plaque signalétique prive de tout élément de départ.

On peut demander de calculer cette machine pour la puissance et pour une vitesse donnée d'avance. Ou même, ce qui est plus difficile, de déterminer la puissance maximum pour une vitesse donnée d'avance. Dans ce dernier cas, le calcul ne fixerait qu'une puissance approximative dont la valeur exacte devrait être déterminée par essai.

La question de tension ne sera en général pas gênante pour les moteurs de petite et de moyenne puissance pour les tensions de 110 à 550 volts. Ce n'est qu'en passant de la basse à la haute tension entre 3000 et 6000 volts qu'on est obligé de renforcer l'isolement, ce qui signifie une diminution notable de la puissance du moteur.

Le rebobinage des rotors n'influence pas le caractère essentiel du calcul; d'ailleurs les moteurs de petite et de moyenne puissance à bagues ne se construisent presque plus.

Chapitre 2

PRINCIPE DES MOTEURS ASYNCHRONES

Le principe du fonctionnement des moteurs asynchrones triphasés est basé sur le fait que le courant triphasé circulant dans l'enroulement du stator crée un champ magnétique tournant; ce champ induit dans l'enroulement du rotor les courants alternatifs, qui réagissent sur le champ tournant du stator en créant un couple qui entraîne le rotor dans la direction de rotation du champ tournant.

Le champ tournant, exactement comme dans les machines à courant continu, peut être à deux, quatre ou six pôles et même davantage. Il est d'usage de compter le nombre de pôles par paires. Le nombre de paires de pôles des machines à courant continu est défini par le circuit magnétique dont les champs sont immobiles par rapport à ses enroulements. Par contre, le nombre de paires de pôles du champ tournant est défini par l'arrangement de l'enroulement statorique.

Etant donné que le courant triphasé circulant dans cet enroulement est variable, le champ tournant se déplace par rapport aux enroulements dans le sens de la succession de phases.Il est évident qu'à la fin d'une période de variation du courant, le spectre du champ tournant doit se déplacer de telle façon que la distribution de ses lignes de force dans l'espace soit la même qu'au début de cette période.

La fig.1 représente les champs tournants avec une, deux et trois paires de pôles. Il découle de la figure que pour reproduire la même distribution de lignes de forces, il faut tourner le champ dû à deux pôles de 360°, celui de quatre pôles de 180° et celui de six pôles de 120°.

Il s'ensuit qu'avec un courant d'alimentation à fréquence constante le champ à polarité multiple tourne dans l'espace p fois plus lentement que le champ à deux pôles, p étant le nombre de paires de pôles du champ multipolaire. Si f est la fréquence du courant, ou le nombre de périodes de sa variation par seconde, la vitesse de rotation No, ou le nombre de tours par minute, du champ bipolaire sera :

$$No = 60 \times f$$

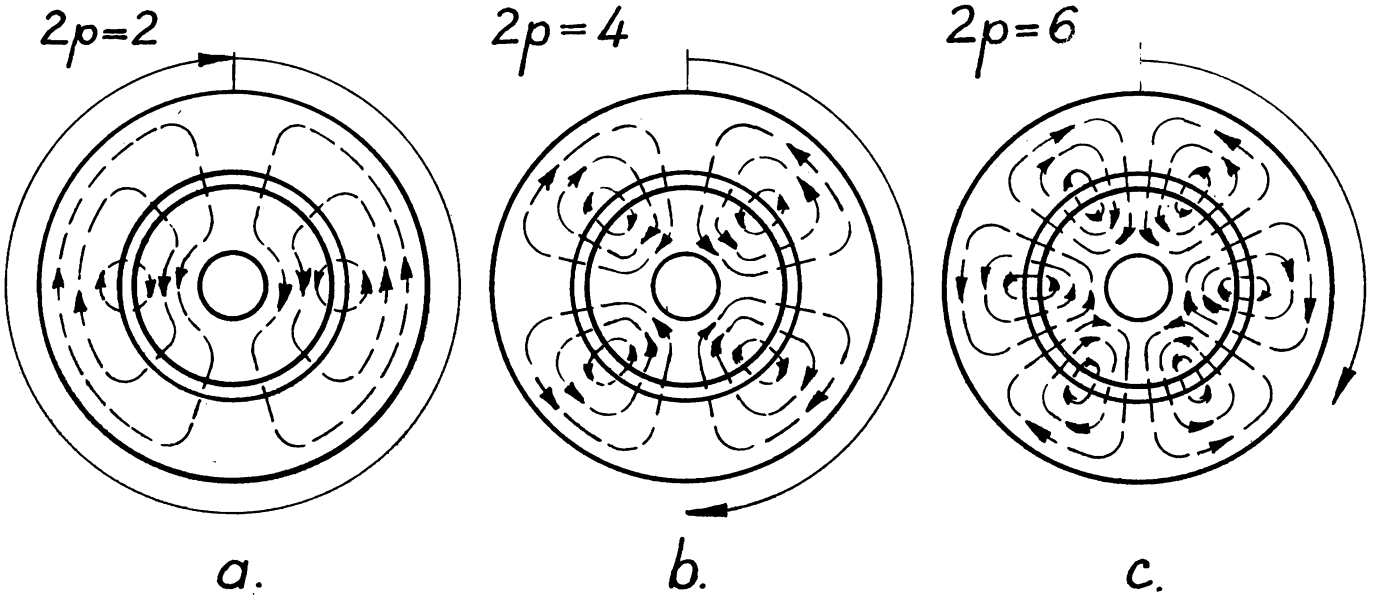


Fig.1 – Champs tournants à diverses polarités.

et celle du champ multipolaire :

$$N_o = \frac{60 \times f}{p} \qquad (1)$$

TABLEAU N° I

Fréquence en *Hz*	2 pôles	4 pôles	6 pôles	8 pôles	10 pôles	12 pôles
25	1500	750	500	375	300	250
33,3	2000	1000	666	500	400	333
42	2520	1260	840	630	504	420
42,5	2550	1275	850	637,5	510	450
50	3000	1500	1000	750	600	500
60	3600	1800	1200	900	720	600
120	7200	3600	2400	1800	1440	1200

Cette vitesse du champ tournant est appelée vitesse synchrone.

Le tableau 1 donne les vitesses synchrones en nombres de tours par minute suivant le nombre de pôles et les fréquences usuelles des réseaux d'alimentation.

En réalité, la plaque signalétique d'un moteur asynchrone indique la vitesse réelle nominale du moteur qui est toujours légèrement inférieure à la vitesse synchrone, même à vide. Donc il existe un retard du rotor par rapport au champ tournant.

Ce retard est provoqué par la charge et lui est proportionnel. L'existence de ce retard loin d'être gênante est au contraire nécessaire. En effet, si le rotor tournait à la vitesse synchrone du champ tournant, il n'y aurait pas de courants induits dans le rotor, vu que le champ paraîtrait immobile par rapport au rotor. Donc, il n'y aurait pas de couple appliqué au rotor et la puissance du moteur serait nulle.

La différence entre la vitesse synchrone N_o et la vitesse réelle N mesure la vitesse de champ tournant par rapport au rotor. Le rapport de cette différence à la vitesse synchrone est appelé "glissement" :

$$g = \frac{N_o - N}{N_o} \quad \text{et en pour-cent} \quad g = \left(\frac{N_o - N}{N_o}\right) 100 \qquad (2)$$

Sachant que le glissement varie entre 1,5 à 5 %, il est aisé de retrouver la vitesse synchrone et de calculer le glissement d'après les indications de la plaque signalétique.

Exemple : La plaque indique N = 960 tr/min et f = 50 Hz, la vitesse synchrone sera de 1000 tr/min et le glissement calculé par :

$$g = 100 \frac{1000 - 960}{1000} = 100 \frac{40}{1000} = 4\ \%$$

La longueur du paquet de tôles Lf peut être relevée facilement. Si toutefois, son relevé le long du diamètre extérieur était impossible, il faudrait le mesurer au fond de l'encoche parce qu'au diamètre d'alésage l'effet du baillement des dents donnerait une longueur trop grande.

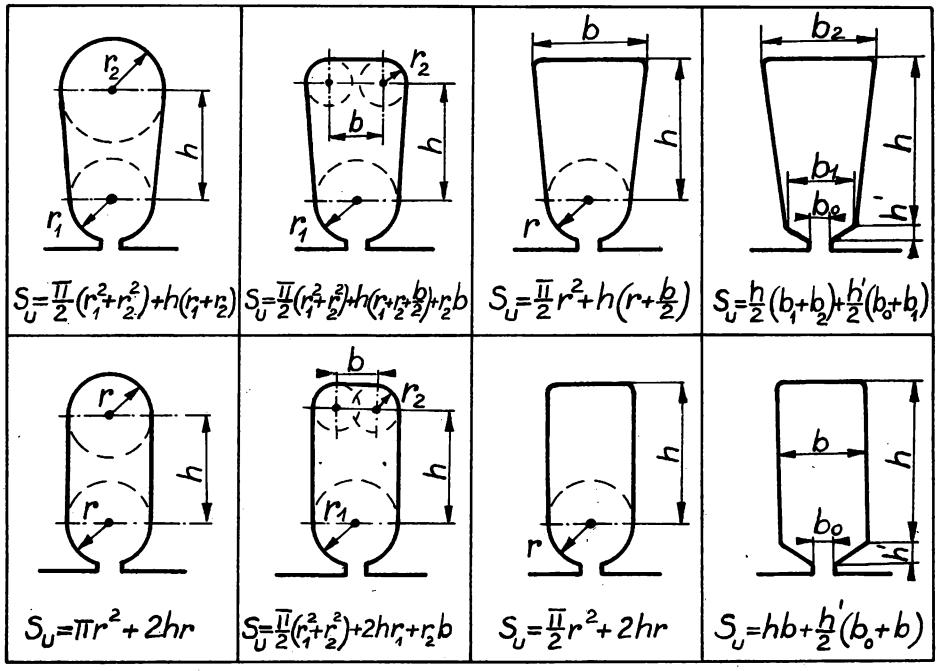
Le nombre des encoches statoriques N_1 est toujours divisible par 3 et est souvent pair.

Il est très important de relever les cotes exactes d'une encoche. On peut en effectuer soit la mesure directe, soit la mesure indirecte d'une impression d'encoche sur feuille de plomb de 2 à 3 mm d'épaisseur. Une feuille en leathéroïd peut avantageusement remplacer le plomb.

Il est préférable de contrôler les cotes relevées sur plusieurs encoches.

Ayant les cotes d'encoche on peut calculer leurs sections en se servant de formules du tableau 2. Evidemment, il y a lieu de retrancher la section des isolants pour avoir la surface utile de l'encoche.

TABLEAU N° 2



Il ne faut pas manquer de compter les canaux transversaux (fig.3) et de mesurer leur largeur "l_{can}".

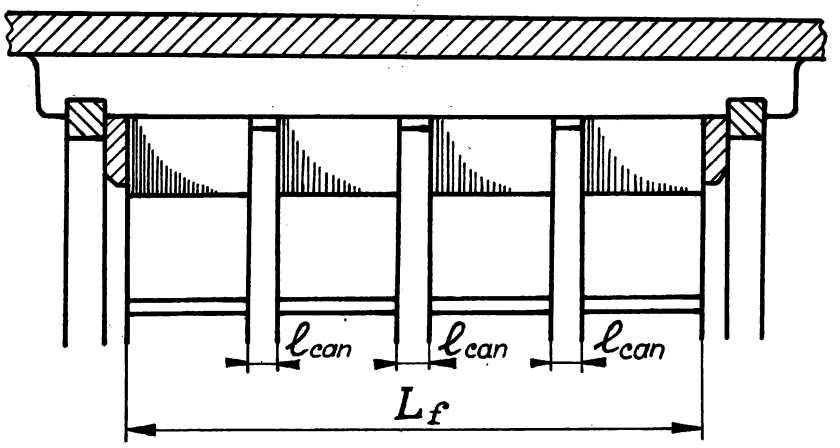


Fig.3 – Canaux transversaux de ventilation.

On doit aussi noter le nombre n_c de canaux circulaires (fig.4), leur diamètre d_c et le diamètre D_c sur lequel ils sont disposés. Ces canaux se trouvent surtout sur les machines modernes, entièrement fermées.

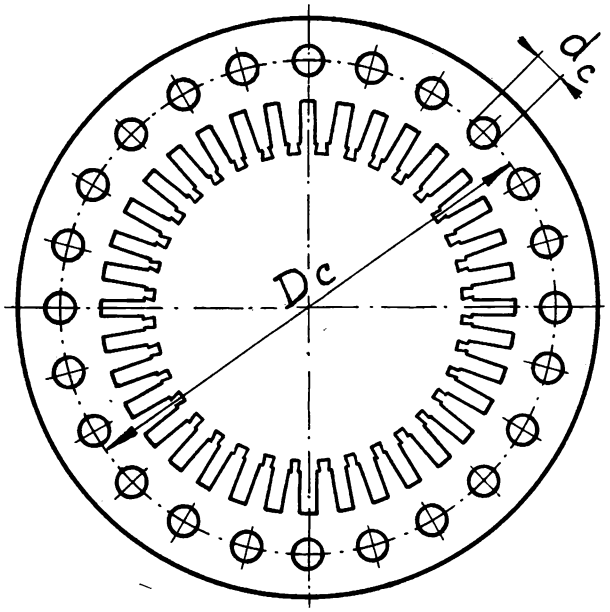


Fig.4 - Canaux axiaux de ventilation.

On notera l'épaisseur de tôles magnétiques (généralement: 0,5mm) ainsi que leur isolement. A cette fin, il faut écarter prudemment une dent et examiner si les tôles sont isolées au papier, à l'émail ou tout simplement recuites. Ce dernier isolement s'est généralisé dans le construction de moteurs de petites puissances.

Les dimensions du rotor ne sont relevées que lorsqu'on rebobine le rotor. Dans ce cas on se contente de relever le nombre d'encoches et leurs dimensions.

La nécessité de relever la hauteur de la couronne rotorique se présente rarement. Dans la plupart des petits moteurs, les tôles rotoriques sont empilées directement sur l'arbre, de sorte que le diamètre intérieur du rotor est aussi le diamètre de l'arbre. Mais il existe des moteurs avec les oufes de ventilation (fig.5). Dans ce cas il faut prendre pour D_i le diamètre circonscrit de ces ouvertures.

Il est à noter que la longueur relevée du paquet de tôles rotoriques L_f peut être différente de la longueur du paquet de tôles statoriques. Cela peut être dû soit aux imprécisions de fabrication, soit voulu.

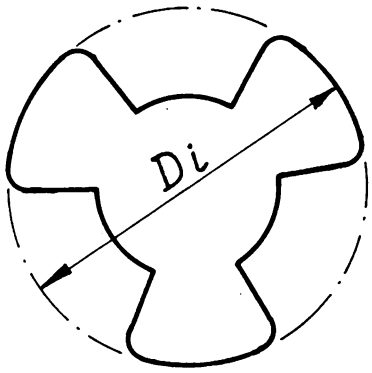


Fig.5 – Canaux rotoriques de ventilation.

Chapitre 3

RELEVE DES DIMENSIONS

Généralement lorsque le rebobinage se fait en dehors de l'usine d'origine, on ne dispose pas de la spécification magnétique et électrique du moteur à rebobiner. Dans ce cas, avant d'entreprendre le calcul, il y a lieu de définir les dimensions du circuit magnétique.

Il est préférable d'enlever l'enroulement complètement et de nettoyer les tôles magnétiques avec un chiffon imbibé de pétrole.

Avant de commencer le débobinage il y a lieu de noter un certain nombre de points, si cela est encore possible, pour se procurer les données et renseignements nécessaires au rebobinage. Il est même recommandé de relever des indications surabondantes sur le bobinage car ces indications peuvent aussi servir pour d'autres travaux.

Les points suivants doivent être notés avant le débobinage du stator :

1) schéma de l'enroulement,
2) le pas des sections dans les encoches,
3) dimensions du conducteur nu et isolé,
4) mode d'isolement des conducteurs,
5) épaisseur de l'isolement d'encoche et qualité de cet isolement,
6) remplissage des encoches,
7) noter encore la longueur de têtes de bobines et leur développement.

Il est à conseiller, afin d'éliminer les erreurs possibles, de relever toutes les dimensions plusieurs fois dans des endroits différents.

Le diamètre intérieur du stator D_a (fig.2), appelé aussi "alésage", servant de base de calcul pour d'autres dimensions, doit être mesuré soigneusement.

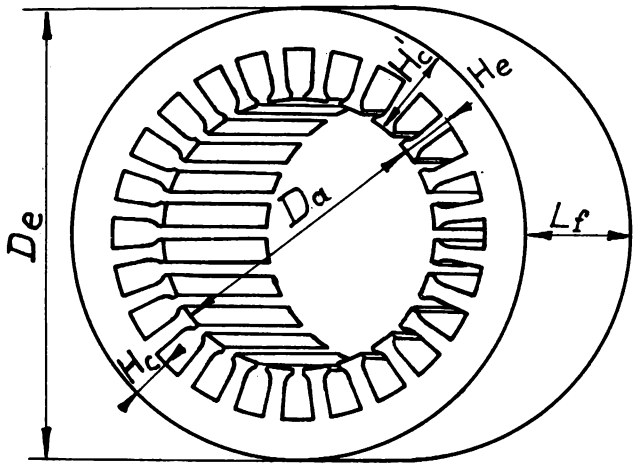


Fig.2 -Dimensions fondamentales d'un circuit magnétique statorique.

Si on n'arrive pas à mesurer le diamètre extérieur D_e directement on peut mesurer la cote H'_c et alors, ayant D_a, on a :

$$D_e = D_a + 2\ H'_c \qquad (3)$$

La hauteur de la culasse H_c peut être mesurée ou déduite de H'_c, lorsque la hauteur de l'encoche H_e est connue. On a :

$$H_e = H'_c - H_c$$

Tous les résultats du relevé effectué ci-dessus, ne peuvent pas être employés tels quels, ils doivent être réduits aux unités de formule et affectés de coefficients.

En premier lieu, il est important de définir une grandeur qu'on appelle "arc polaire".

C'est la longueur de circonférence de l'alésage se trouvant sous un pôle. Le diamètre d'alésage étant D_a l'arc polaire est égal à :

$$\tau = \frac{D_a \times \Pi}{2p} \qquad (4)$$

Tout le long de cette longueur, exprimée en centimètres, chaque pôle du champ tournant conserve sa polarité.

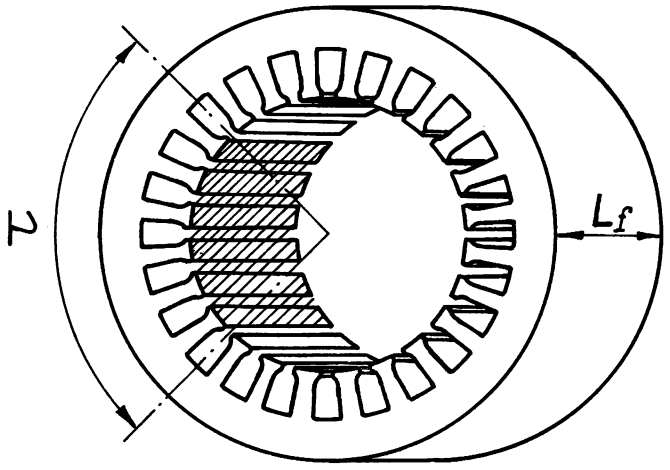


Fig.6 - Surface de l'entrefer par pôle.

SECTION DE L'ENTREFER.

Pour le calcul d'induction dans l'entrefer, on emploie la longueur corrigée du paquet de tôles L_c, elle est égale à :

$$L_c = L_f - l_{can} \times n \qquad (5)$$

ou "*n*" est le nombre de canaux transversaux.

Si les canaux manquent : $L_c = L_f$

Toutes les longueurs sont exprimées en centimètres.

Le produit de l'arc polaire τ et de la longueur corrigée L_c donne en centimètres carrés la surface d'entrefer S_e occupée par un pôle de champ tournant sur la surface intérieure du stator d'où :

$$S_e = \tau \times L_c \qquad (6)$$

Pour le calcul des inductions dans les dents et la culasse on a besoin de connaître la longueur nette L_n du paquet de tôles magnétiques (longueur du fer "actif").

Les tôles magnétiques, même pressées, ne viennent jamais parfaitement l'une contre l'autre. Ceci est aussi vrai pour les tôles non isolées. De sorte que pour obtenir la longueur nette L_n du fer, il ne suffit pas de retrancher la somme de longueurs des canaux transversaux, s'ils existent, mais il faut multiplier la différence par un coefficient d'utilisation "k".

Ce coefficient est établi par l'expérience, il dépend de l'épaisseur des tôles et du genre de leur isolement.

On a en centimètres :

$$L_n = k\ (L_f - n \times l_{can}) \qquad (7)$$

La valeur du coefficient d'utilisation k peut être prise suivant le tableau 3.

La section de la culasse du stator S_{cs} est donnée en centimètres carrés par la formule :

$$S_{cs} = H_c \times L_n \qquad (8)$$

si elle ne comporte pas de canaux longitudinaux.

En cas de canaux longitudinaux, on peut utiliser la formule expérimentale :

$$S_{cs} = (H_c - \frac{2}{3}\ dc) \times L_n \qquad (9)$$

TABLEAU N° 3

Epaisseur des tôles	Genre d'isolement		
	Sans isolement	Tôles émaillées	Isolées au papier
0,5 mm	0,95	0,93	0,90
0,35 mm	0,93	0,90	0,87

SECTION DE L'ENCOCHE

Lorsque les encoches sont ouvertes ou fermées on n'a pas besoin de calculer leur section car les conducteurs se logent en occupant les endroits bien déterminés. Par contre, il est absolument nécessaire de calculer la section des encoches semi-fermées recevant les fils ronds semés par l'entaille. Ces sections d'enroulement sont enroulées sur une forme de roulage.

Le tableau 2 donne les formules utilisées pour le calcul des sections suivant la forme de l'encoche. Il est entendu qu'il y a lieu de retrancher de ces sections, la section occupée par l'isolant et la languette de calage. L'isolement à la masse de l'encoche est assuré par une gouttière isolante, appelée aussi rainure d'encoche figurée en 1 à la fig. 7.

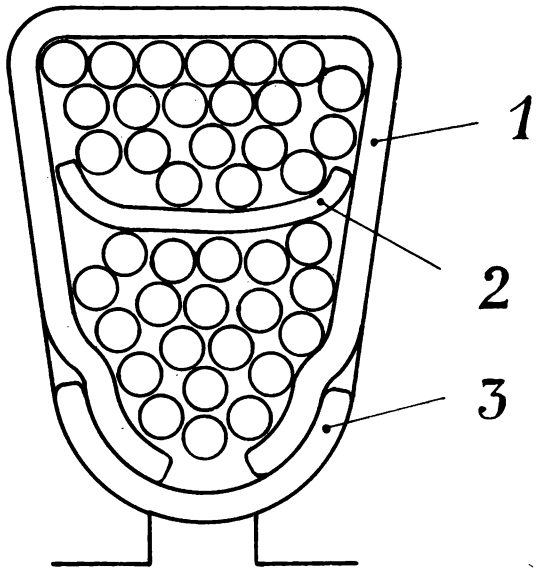


Fig.7 – Encoche d'un moteur de petite puissance.

L'épaisseur de cette rainure doit être majorée de 0,1 mm pour tenir compte de l'alignement imparfait des tôles et de 0,05 mm pour tenir compte du foisonnement de l'isolant, de sorte que si l'épaisseur de la rainure est de 0,7 mm, il faut compter l'épaisseur 0,7 mm + 0,1 mm + 0,05 mm = 0,85 mm lorsqu'on retranche de la section nette de l'encoche, la section des isolants 1, 2 et 3.

La section utile S_u ainsi obtenue sera employée pour calculer le diamètre de fil de bobinage.

SECTION DE DENTS *(Fig. 8)*

La dernière dimension dont on a besoin pour le calcul est la section de la dent S_d. La largeur d'une dent l_d peut être uniforme, comme c'est le cas des encoches trapézoïdales; si la lar-

geur de la dent varie sur toute sa hauteur, on utilise la largeur l_d se trouvant à un tiers de la hauteur de la dent. Si on a eu soin de relever les largeurs l''_d et l'_d, la largeur à considérer est donnée par :

$$l_d = \frac{2l'_d + l''_d}{3} \qquad (10)$$

La section d'une dent est le produit de la largeur l_d et de la longueur nette L_n. Si on a N_1 dents au stator, par pôle, on aura $\frac{N_1}{2p}$ dents. D'où la section de dents d'un pôle en centimètres carrés :

$$S_s = \frac{N_1 \times l_d \times L_n}{2p} \qquad (11)$$

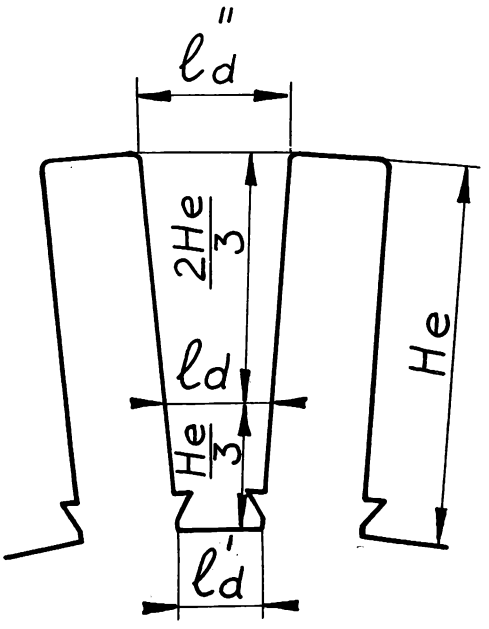


Fig.8 – La largeur d'une dent utilisée dans le calcul.

Chapitre 4

TYPES DE BOBINAGES STATORIQUES

Plusieurs variantes de bobinages modernes seront décrites dans ce chapitre. La fabrication en série a grandement simplifié la forme des sections, réduit le nombre des matériaux utilisés surtout pour les bobinages à petites encoches semi-fermées. On arrive ainsi avec des procédés mécaniques modernes de fabrication de section à pouvoir effectuer tous les couplages désirés avec des éléments de bobinages interchangeables. Le rebobineur peut transformer de nombreux moteurs d'un type ancien en moteurs modernes.

La grandeur caractéristique d'un enroulement est le nombre d'encoches par pôle et par phase, que nous désignerons par q_1.

Ce nombre définit la construction de l'enroulement et influe sur le choix de son type. Par définition :

$$q_1 = \frac{N_1}{3 \times 2p} = \frac{N_1}{6p} \qquad (12)$$

Le nombre q_1 peut être fractionnaire. Lorsque q_1 est entier, les conducteurs de chaque phase et de chaque pôle occupent le volume correspondant aux q_1 encoches. Par contre, lorsque q_1 est fractionnaire, les conducteurs d'une phase occupent les volumes différents aux différents pôles.

L'exécution d'enroulements symétriques par rapport à toutes les phases n'est pas possible pour toutes les valeurs fractionnaires de q_1. Par exemple, pour un dénominateur égal à trois ou multiple de trois, il est impossible d'obtenir un enroulement symétrique. En ce qui concerne l'enroulement dissymétrique, son emploi doit être évité car les moteurs avec de tels enroulements, surtout les petits, risquent d'avoir un couple de démarrage faible, de s'échauffer et de produire des bruits magnétiques.

Par exemple, avec le nombre d'encoches $N_1 = 48$, il n'est pas possible de réaliser un enroulement symétrique pour un moteur à six pôles parce que le nombre q_1 par pôle et par phase sera :

$$q_1 = \frac{N_1}{6p} = \frac{48}{6 \times 3} = \frac{48}{18} = 2\,\frac{2}{3}$$

où le dénominateur de la partie fractionnaire est égal à trois.

Tout type d'enroulement doit satisfaire à des conditions complémentaires pour être réalisable . Il devra être exécuté de sorte que les courants dans tous les conducteurs d'une même phase et de même pôle soient de même sens et de sens contraire dans le pôle voisin.

La succession des encoches occupées par les conducteurs de phases différentes, doit suivre le même ordre tout le long de la circonférence du stator.

Les conducteurs d'une même phase peuvent être connectés en série et dans la plupart des cas ils peuvent être connectés en parallèle par deux groupes et plus, à condition toutefois que ces groupes soient identiques en nombre et en disposition des conducteurs. La possibilité de mise en parallèle des sections d'une même phase dépend de la polarité et du type d'enroulement.

Pratiquement tous les bobinages des moteurs asynchrones de petite et de moyenne puissance se font suivant trois types fondamentaux : bobinage concentrique, bobinage imbriqué à deux sections par encoche et bobinage imbriqué à une section par encoche.

Chacun de ces bobinages a ses avantages et ses inconvénients. Ils se distinguent par leurs particularités et leurs conditions d'exécution. On doit donc les prendre en considération lors du choix du type de bobinage.

Bobinages concentriques :

On rencontre encore souvent ce genre de bobinage (fig.9) quoiqu'il soit considéré à l'heure actuelle comme démodé. Sa caractéristique principale est d'avoir pour chaque phase et par paire de pôles des sections avec le même nombre de spires, mais toutes les sections n'ont pas la même forme. Etant concentriques les sections extérieures sont plus larges et les sections intérieures plus étroites. Les têtes de bobines voisines appartenant aux différentes phases ne sont pas identiques; elles peuvent être à deux et même à trois nappes.

L'enroulement concentrique se distingue aussi des autres genres d'enroulement par le fait que pour un même flux, une même encoche et même isolants, il nécessite moins de fils de même diamètre et cela parce que toutes choses égales d'ailleurs, le coefficient de bobinage est plus élevé pour cet enroulement, voir à cet effet le chapitre 8.

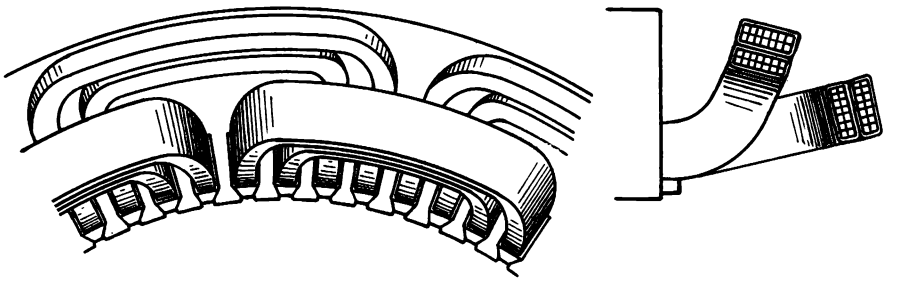


Fig.9 - Enroulement concentrique à deux étages.

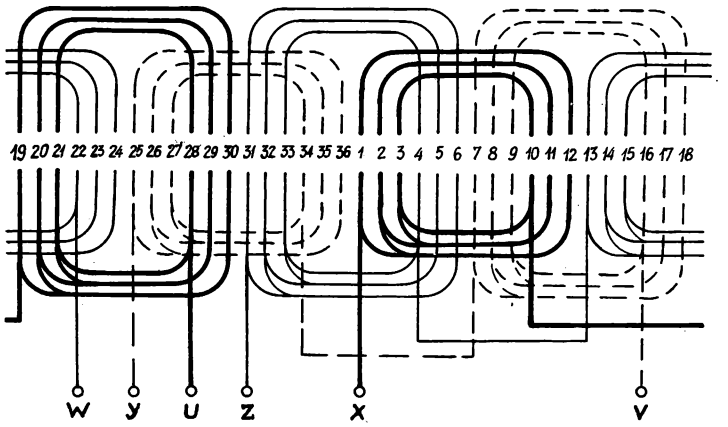


Fig.10 - Schéma d'un enroulement concentrique à quatre pôles avec trois encoches par pôle et par phase.

La fig.10 représente le schéma développé d'un bobinage concentrique dont les têtes sont à deux nappes pour un moteur à quatre pôles avec trois encoches par pôle et par phase. Chaque phase est représentée par un trait différent. Il est évident que les trois phases sont symétriques. En effet, chaque phase a un groupe de sections de première nappe, bobines avec têtes courtes, et un groupe de sections de seconde nappe, bobines avec têtes longues,en plus les deux groupes de chaque phase sont couplés en série.

Les deux groupes de sections ayant des résistances et des réactances différentes, ils ne pourront pas avoir une distribution symétrique de courant, pour cette raison leur couplage en parallèle ne serait pas justifié.

La fig.11 représente un schéma de bobinage concentrique avec N_1 = 36 encoches, pour un moteur à 6 pôles avec deux encoches par pôle et par phase. Ici, chaque phase a trois groupes de sections, mais leur distribution par nappe est différente. Dans une phase on a deux groupes de première nappe et un groupe de seconde nappe, dans une autre phase, on a un groupe de première nappe et deux groupes de seconde nappe. En ce qui concerne la troisième phase, elle a un groupe dans chaque nappe et un troisième groupe d'une forme mixte, dont un côté appartenant à la première nappe et l'autre côté appartenant à la seconde nappe. Il est évident qu'on aura ce groupe "mixte" chaque fois que le nombre de paires de pôles sera impair. Comme dans le cas précédent, le seul couplage rationnel entre groupes est le couplage en série.

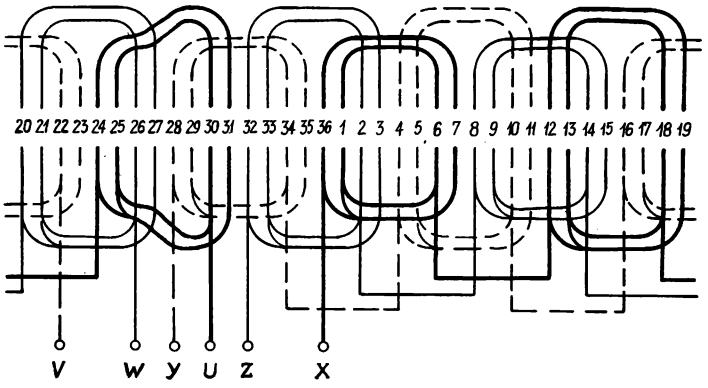


Fig.11 – Schéma d'un enroulement concentrique à six pôles avec deux encoches par pôle et par phase.

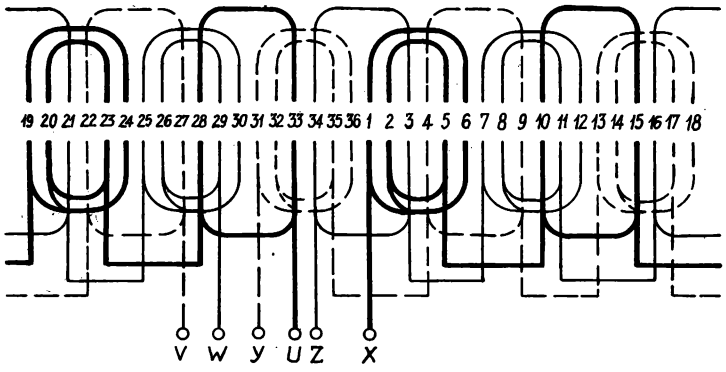


Fig.12 – Schéma d'un enroulement concentrique à huit pôles avec 1,5 encoches par pôle et par phase.

Finalement la fig.12 représente le schéma d'un bobinage concentrique avec N_1 = 36 encoches, pour un moteur à 8 pôles avec q = 1,5 encoches par pôle et par phase. On peut voir que ce bobinage contient différents groupes de sections. Chaque phase a deux groupes de deux sections et deux sections seules qui se trouvent entre les groupes de deux sections.

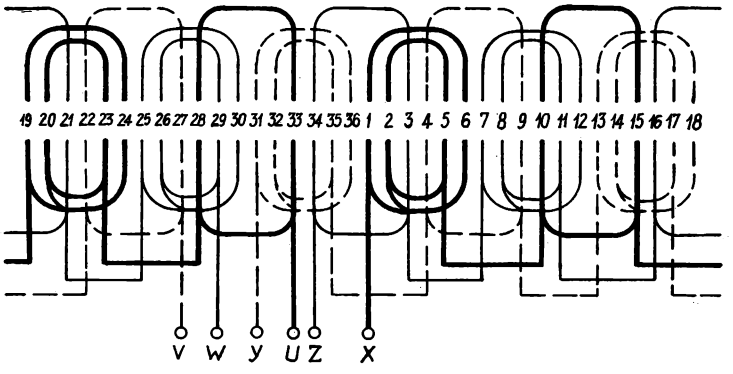


Fig.12 – Schéma d'un enroulement concentrique à huit pôles avec 1,5 encoches par pôle et par phase.

Les têtes de tous les groupes de deux sections sont situées dans une nappe et les têtes de toutes les sections seules sont dans une autre nappe. Contrairement à ce qu'on a vu précédemment il est possible de coupler les sections d'une même phase en deux branches parallèles, chaque branche aura un groupe de deux sections et une section seule.

Les trois exemples ci-dessus font ressortir clairement les conditions à satisfaire pour que le bobinage concentrique à deux nappes soit réalisable. Comme le nombre d'encoches N_1 doit être pair et multiple de trois, pour tout bobinage triphasé, la première condition est que N_1 soit divisible par six.

D'autre part, pour que le nombre d'encoches par pôle et par phase q_1 soit entier, il faut que la fraction $\frac{N_1}{6}$ soit divisible par le nombre de paires de pôles p, sinon q_1 sera fractionnaire.

En principe, tous les nombres q_1 fractionnaires permettent de réaliser l'enroulement symétrique, sauf ceux qui ont pour dénominateur un multiple de trois. Mais en pratique l'enroulement réalisé avec un dénominateur plus grand que deux pour la partie fractionnaire de q_1 aura toutes les sections différentes, ce qui en compliquera l'exécution.

En ce qui concerne la mise en parallèle, elle n'est possible que pour un nombre de paires de pôles p pair et encore à condition que les deux circuits mis en parallèle soient identiques.

Donc la moitié du nombre de paires de pôles $\frac{p}{2}$ définit le nombre maximum de circuits qu'on peut mettre en parallèle.

Le tableau 4 donne les nombres d'encoches par pôle et par phase q_1 réalisables établis pour N_1 de 9 à 120 et $2p$ de 2 à 12. Un astérisque indique les nombres d'encoches les plus usuels. Il est aisé de se rendre compte que ces nombres d'encoches permettent de réaliser le plus grand nombre de polarités différentes.

TABLEAU N° 4

Tableau donnant les nombres d'encoches réalisables par pôle et par phase d'un enroulement triphasé :

Nombre de pôles	Nombre d'encoches statoriques N_1																		
	12	18	* 24	30	* 36	42	* 48	* 54	* 60	66	* 72	78	84	* 90	* 96	102	* 108	114	* 120
2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4	1	[1 1/2]	2	[2 1/2]	3	[3 1/2]	4	[4 1/2]	5	[5 1/2]	6	–	–	–	–	–	–	–	–
6	–	1	–	–	2	–	–	3	–	–	4	–	–	5	–	–	6	–	–
8	–	–	1	[1 1/4]	1 1/2	[1 3/4]	2	[2 1/4]	2 1/2	[2 3/4]	3	[3 1/4]	3 1/2	[3 3/4]	4	[4 1/4]	4 1/2	–	–
10	–	–	–	1	1 1/5	1 2/5	1 3/5	1 4/5	2	2 1/5	2 2/5	2 3/5	2 4/5	3	3 1/5	3 2/5	3 3/5	3 4/5	4
12	–	—	—	—	1	–	–	1 1/2	–	–	2	–	–	2 1/2	–	–	3	–	–

Note : Les nombres encadrés sont réalisables pour un enroulement imbriqué à deux sections par encoche pour deux circuits en parallèle.

Les nombres soulignés sont réalisables pour un enroulement imbriqué à deux sections par encoche pour quatre circuits en parallèle.

Tableau complémentaire donnant les nombres d'encoches réalisables par pôle et par phase d'un enroulement à deux sections par encoche :

Nombre de pôles	Nombre d'encoches statoriques N_1																		
	9	15	21	* 27	33	39	* 45	51	57	* 63	69	75	* 81	87	93	99	105	111	117
2	1 1/2	2 1/2	3 1/2	4 1/2	5 1/2	6 1/2	7 1/2	8 1/2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4	–	1 1/4	1 3/4	2 1/4	2 3/4	3 1/4	3 3/4	4 1/4	4 3/4	5 1/4	5 3/4	–	–	–	–	–	–	–	–
6	–	–	–	[1 1/2]	–	–	[2 1/2]	–	–	[3 1/2]	–	–	4 1/2	–	–	5 1/4	–	–	–
8	–	–	–	1 1/8	1 3/8	1 5/8	1 7/8	2 1/8	2 3/8	2 5/8	2 7/8	3 1/8	3 3/8	3 5/8	3 7/8	4 1/8	–	–	–
10	–	–	–	–	1 1/10	1 3/10	1 1/2	1 7/10	1 9/10	2 1/10	2 3/10	2 1/2	2 7/10	2 9/10	3 1/10	3 3/10	3 1/2	3 7/10	3 9/10
12	–	–	–	–	–	–	[1 1/4]	–	–	[1 3/4]	–	–	[2 1/4]	–	–	[2 3/4]	–	–	[3 1/4]

Note : Les nombres encadrés sont réalisables pour un enroulement imbriqué à trois circuits en parallèle.

Les nombres soulignés sont réalisables pour un enroulement imbriqué à cinq circuits en parallèle.

Les nombres N_1 les plus employés sont marqués par un astérisque.

Les bobinages concentriques, dont les têtes de bobines sont disposées en trois nappes, s'employent exclusivement dans les moteurs à deux pôles. La disposition à deux nappes pour ces moteurs n'est pas pratique, étant donné que dans ce cas toutes les sections ont une forme et des dimensions différentes.

La fig.13 représente un bobinage à deux pôles avec N_1 - 36. Sa particularité consiste en ce que dans chaque phase les sections sont divisées en deux groupes identiques, qu'on peut coupler soit en série, soit en parallèle.

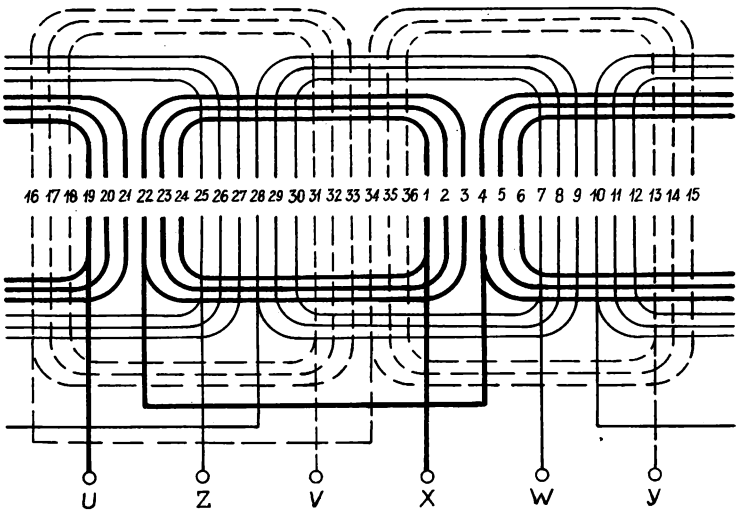


Fig.13 - Schéma d'un enroulement concentrique à deux pôles avec six encoches par pôle et par phase, les têtes de bobines en trois étages.

L'avantage du bobinage concentrique consiste en la possibilité de l'utiliser dans les stators à encoches fermées, dont l'entaille n'est pas large assez pour permettre de semer les conducteurs par l'entaille.

Lorsque des sections sont constituées par un grand nombre de spires de dimensions relativement petites, généralement dans les moteurs de petite puissance, on peut réaliser l'enroulement sur le stator même par la méthode dite "par enfilade". Le conducteur est tiré à travers l'encoche autant de fois qu'il y a de spires par section.

Les têtes de bobines sont formées sur des gabarits apposés provisoirement contre les flancs du stator.

D'autre part, lorsque le nombre de spires par section n'est pas grand, généralement le cas des moteurs de moyenne et de grande puissance, lorsque la section du conducteur est notable, et surtout quand elle est rectangulaire, on exécute des sections d'avance, mais seulement avec une des têtes formée, l'autre est modelée après que la section est introduite en place par enfilade. On aura donc autant de soudures que de conducteurs (fig.14).

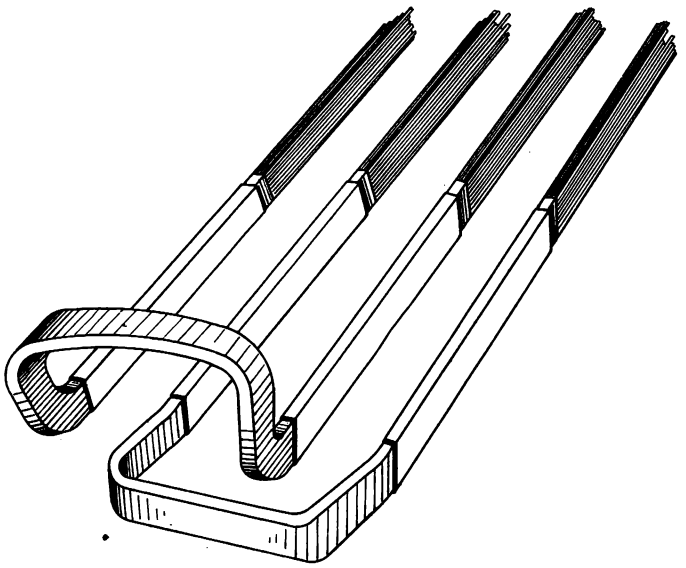


Fig.14 – Sections coupées d'un enroulement concentrique.

Les deux méthodes ci-dessus demandent une dépense de temps énorme. On ne les emploie qu'en cas d'extrême nécessité où le rebobinage ne peut pas être exécuté autrement.

D'autre part, il n'est pas rationnel de recourir au bobinage concentrique lorsqu'on peut introduire l'enroulement par les entailles des encoches. En effet, pour rouler des sections concentriques, il faut utiliser au moins 2 q_1 formes de roulage.

Bobinages imbriqués :

A deux sections par encoche.

Le bobinage imbriqué à deux sections par encoche a l'avantage d'avoir toutes ses sections identiques, elles peuvent donc être roulées sur une forme de roulage unique.

1 - Les sections des moteurs asynchrones de petite et de moyenne puissance, dont les conducteurs sont en fils ronds, sont roulées d'avance et puis introduites dans les encoches semi-fermées par l'entaille fil par fil (fig.15). Le diamètre de fil ne dépassant pas 1,7 mm, ces sections sont assez souples de sorte que leurs têtes se forment par de légers coups de maillet.

2 - Les sections de moteurs asynchrones de moyenne et de grande puissance ont les conducteurs de grosse section : soit en barres pour encoches semi-fermées, soit en méplat pour encoches ouvertes.
Les demi-sections rigides en barres sont introduites dans les encoches par enfilade et ensuite pliées pour exécuter la connexion (fig.16).

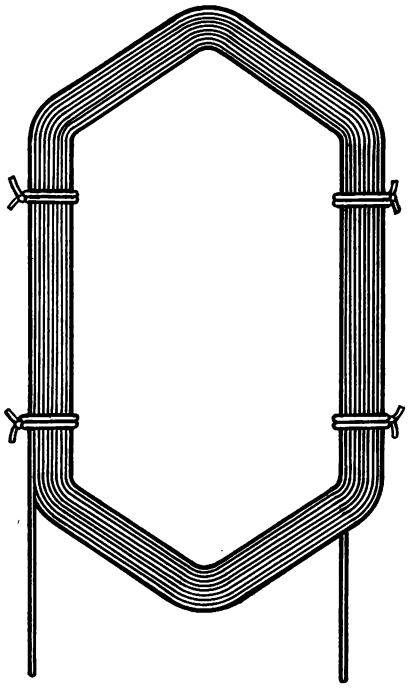


Fig.15 - Section roulée à fils d'un enroulement à 2 sections par encoche.

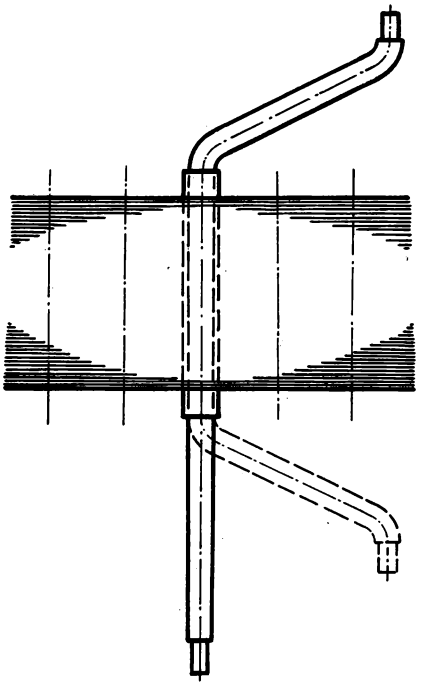


Fig.16 - Demi-sections rigides en barres.

Les sections en conducteurs méplats sont roulées d'avance sur une forme de roulage, puis elles reçoivent leur forme définitive sur une machine à décaler. Elles sont également rigides et ayant leur forme définitive, sont introduites dans des encoches ouvertes (fig.17).
Dans les deux cas, les sections se logent en deux couches, un coté de section se loge dans le fond de l'encoche, formant la couche inférieure, l'autre se loge immédiatement en dessous de la cale de fermeture, formant la couche supérieure (fig.18).

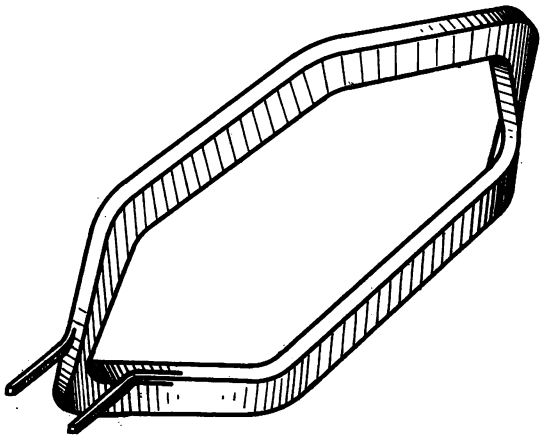


Fig.17 - Section à conducteur méplat d'un enroulement à deux sections par encoche.

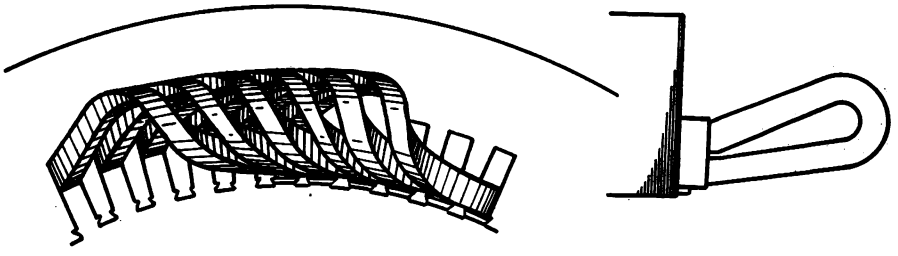


Fig.18 - Sections montées d'un enroulement à conducteur méplat et à deux sections par encoche.

L'enroulement imbriqué à deux sections par encoche a encore l'avantage d'être réalisable avec tout nombre d'encoches (pair et impair) multiple de trois, sauf pour ceux dont le dénominateur de q_1 fractionnaire est multiple de trois. Le tableau 4 donne les nombres q_1 réalisables.

D'autre part, l'enroulement imbriqué à deux sections par encoche a la particularité de présenter le nombre maximum de circuits en parallèle égal au nombre de pôles et ceci pour n'importe quel nombre entier de q_1.

Pour q_1 fractionnaire, le nombre maximum de circuits en parallèle est égal au rapport de $2p$ par le dénominateur de q_1 fractionnaire.

Par exemple, avec ce dénominateur égal à deux, le cas usuel, le nombre maximum de circuits en parallèle est égal à p.

Finalement, le quatrième avantage de l'enroulement imbriqué réside dans la possibilité de modifier les dimensions des sections. En agissant sur le pas du bobinage on peut modifier la largeur d'une section ainsi que la longueur des têtes.

Le pas de l'enroulement y est égal au nombre de dents d'une section. Si ce nombre est égal au nombre d'encoches par pôle (c.à.d. si $y = 3\ q_1$) on a un "pas entier". Si ce nombre est moindre que $3\ q_1$ on a un "pas raccourci".

Les cas du "pas allongé", où y est plus grand que $3\ q_1$, sont très rares.

Seuls des enroulements avec q_1 entier, ont un "pas entier", tous les autres enroulements avec q_1 fractionnaire ont des pas plus ou moins "raccourcis".

Le fait de raccourcir le pas conduit à des encoches dans lesquelles se trouvent des sections de phases différentes. Plus le pas est "raccourci" plus on a de ces encoches avec phases mixtes. Quand le pas y est égal à $2\ q_1$, toutes les encoches ont des sections de phases différentes.

Finalement le pas y peut devenir égal à q. Un raccourcissement plus poussé n'a pas de raison d'être, car il ferait apparaître des encoches, dont les sections, bien que de même phase,

auraient des courants de signes contraires. Pratiquement on s'en tient à un raccourcissement de 80 % environ du pas entier et ce n'est que dans des cas spéciaux qu'on aura recours à un pas plus court ou plus long.

On dit couramment qu'un enroulement a un pas de 1 à 8, si $y = 7$. La fig.19 représente un schéma d'un enroulement imbriqué à deux sections par encoche avec $N_1 = 36$ encoches pour un moteur à 4 pôles et avec $q_1 = 3$, dont toutes les sections sont couplées en série.

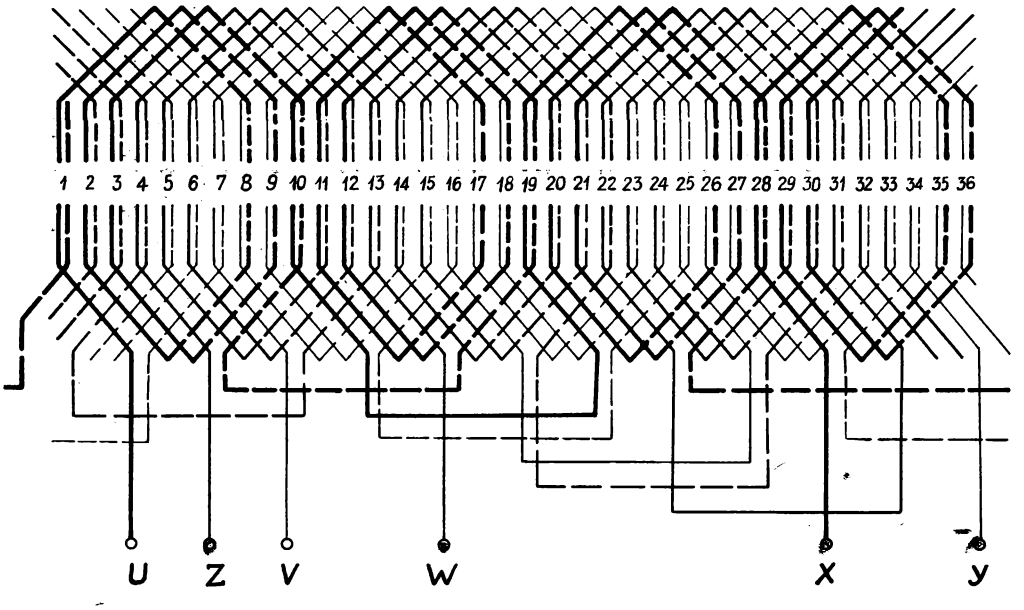


Fig.19 – Schéma d'un enroulement à deux sections par encoche, à pas raccourci à trois encoches par pôle et par phase.

Les avantages des enroulements imbriqués à deux sections par encoche ont contribué grandement ces dernières années à l'extension de leur emploi au détriment des autres genres d'enroulements. Compte tenu de ses avantages, cet enroulement a cependant ses défauts.

Tout d'abord le nombre de sections est double de celui d'autres genres d'enroulements et égal au nombre d'encoches N_1. Ce fait contribue à augmenter le coût du bobinage.

Son second défaut provient de la diminution de la section utile de l'encoche par suite de la présence d'une languette séparant les deux sections. Ce défaut est surtout sensible dans les moteurs de petite puissance. Pourtant cette séparation isolante est indispensable pour les encoches recevant des sections de phases différentes.

De toutes façons, il y a toujours une tension notable entre les deux sections d'une encoche, même si elles appartiennent à une phase unique.

Enroulement imbriqué à une section par encoche.

L'enroulement imbriqué à une section par encoche se présente sous une forme intermédiaire entre l'enroulement imbriqué à deux sections par encoche et l'enroulement concentrique (fig.20).

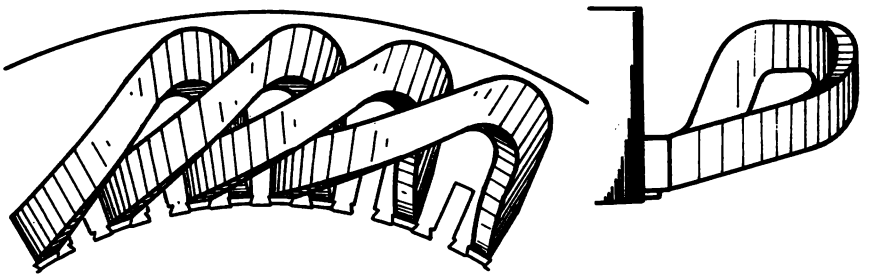


Fig.20 – Sections montées d'un enroulement imbriqué à une section par encoche.

Comme l'enroulement imbriqué à deux sections par encoche, il a toutes ses sections identiques. D'autre part, chaque côté d'une section occupe toute la section utile disponible d'une encoche.

Une languette de séparation n'est pas nécessaire, d'où un meilleur coefficient de remplissage. Ensuite, le nombre de sections est égal à $N_1/2$, comme c'est le cas dans un enroulement concentrique.

La fig.21 représente le schéma d'un enroulement imbriqué à une section par encoche avec q_1 impair et égal à 3. En examinant ce schéma, on constate que le pas de ce genre d'enroulement doit obligatoirement être impair. Et en effet, si les côtés gauches de toutes les sections occupent des encoches portant des numéros impairs, les cotés droits doivent se loger obligatoirement dans les encoches paires. D'autre part, on peut voir que dans chaque double espace polaire, la disposition de sections de toutes les phases se répète. Donc le nombre maximum de circuits en parallèle avec q_1 impair est égal à p.

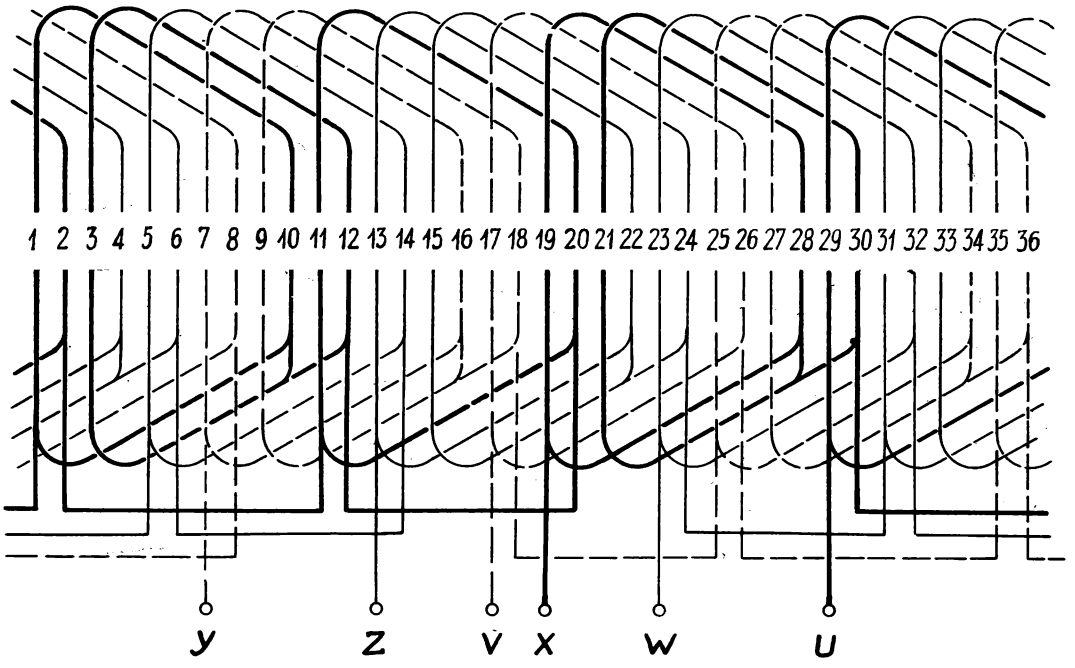


Fig. 21 – Schéma d'un enroulement imbriqué à une section par encoche à quatre pôles et avec trois encoches par pôle et par phase.

La fig.22 représente un autre exemple d'un enroulement imbriqué à une section par encoche avec $q_1 = 2$.

En examinant cet enroulement on peut constater qu'avec q_1 pair, le pas de bobinage ne peut pas être entier, c.à.d. de 100%. En effet, ici le pas entier doit être égal à $N_1/2_p=36/6= 6$ or nous

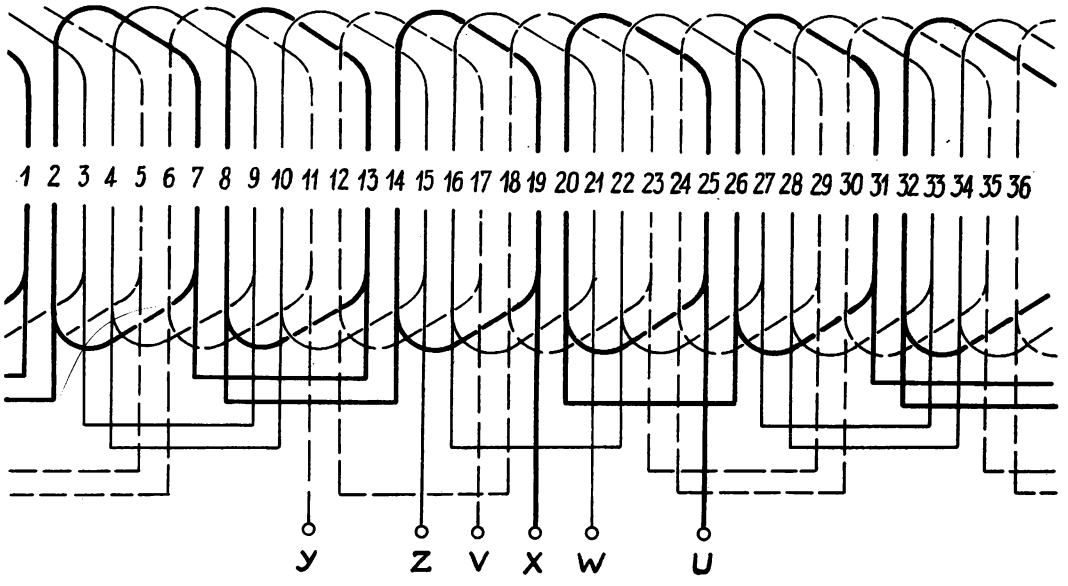


Fig. 22 – Schéma d'un enroulement imbriqué à une section par encoche, à six pôles et avec deux encoches par pôle et par phase.

avons vu plus haut que le pas ne peut pas être pair. Aussi dans chaque espace polaire, la disposition de sections de toutes les phases se répète. Donc avec $q_1 = 2$ on peut réaliser, si le besoin se présente, $2p$ circuits en parallèle.

La fig.23 donne un troisième exemple d'enroulement imbriqué à une section avec un nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase $q_1 = 1\ 1/2$. Tout comme un enroulement concentrique avec $q_1 = 1\ 1/2$, cet enroulement peut avoir $p/2$ circuits en parallèle, c.à.d. que le nombre de circuits est égal au quotient du nombre de paires de pôles par le dénominateur de q_1.

Les conditions de réalisation sont les mêmes que pour l'enroulement concentrique. Le nombre d'encoches N_1 doit être multiple de 6.

Cet enroulement peut avoir pour q_1 toutes les valeurs fractionnaires, sauf celles dont le dénominateur est multiple de trois.

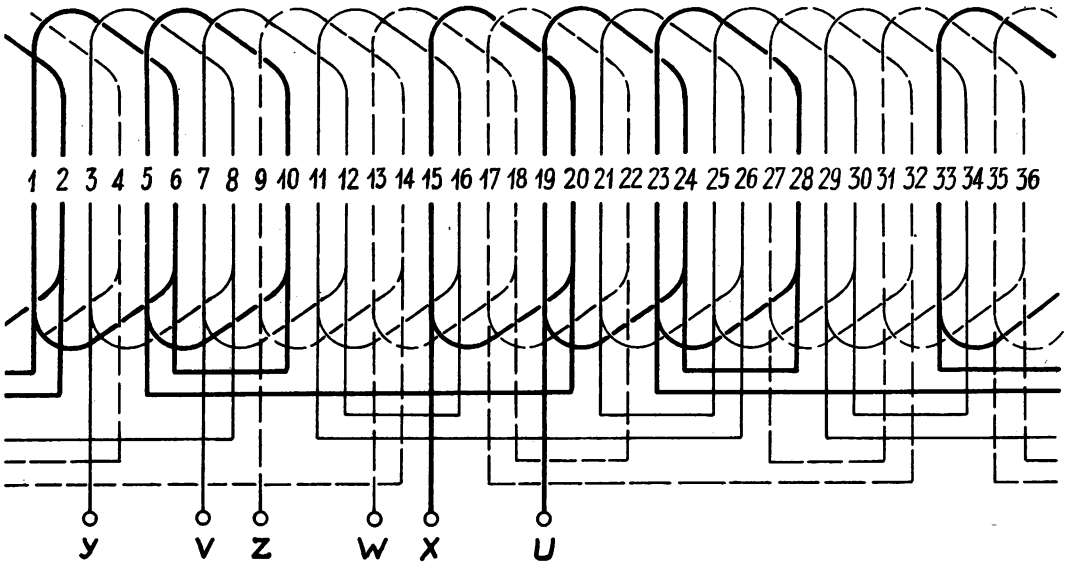


Fig. 23 – Schéma d'un enroulement imbriqué à une section par encoche, à huit pôles et avec 1,5 encoche par pôle et par phase.

La réalisation pratique des enroulements concentriques à une section par encoche avec q_1 fractionnaire est limitée par les nombres ayant pour dénominateur le chiffre 2. Cette restriction ne s'applique pas aux enroulements imbriqués à une section par encoche. On peut réaliser ces bobinages avec toutes les valeurs fractionnaires de q_1, pourvu que toutes les sections soient identiques de forme et de dimensions.

Un enroulement imbriqué à une section par encoche peut être réalisé, comme un enroulement à deux sections par encoche, avec pas raccourci, mais toujours impair.

La fig.24 illustre le cas d'un enroulement avec pas raccourci à 80 % environ.

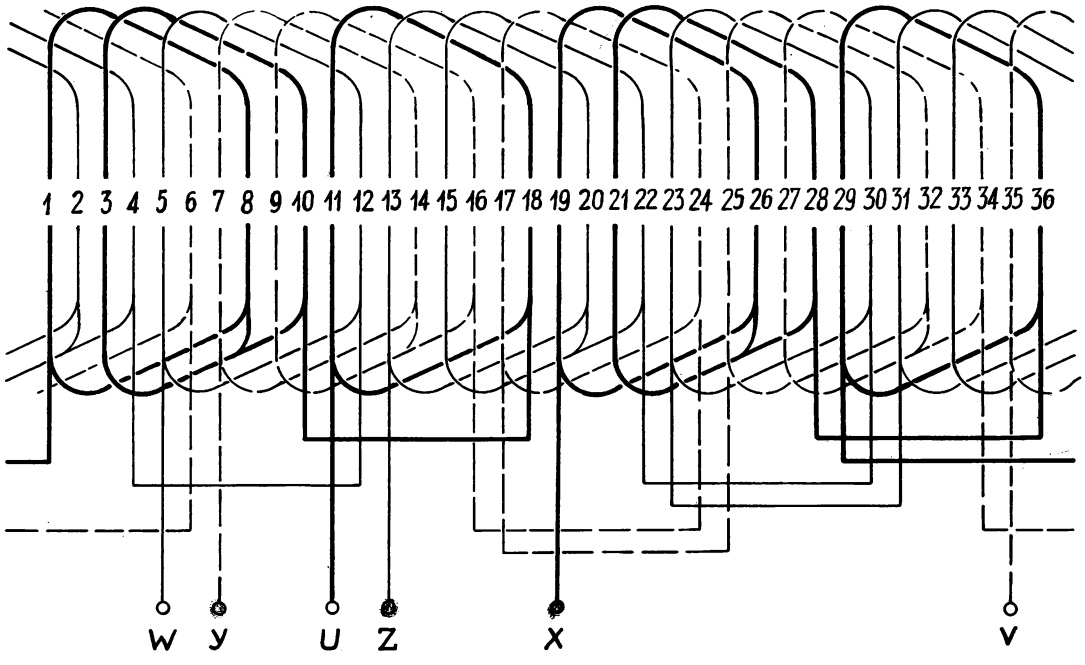


Fig.24 - Schéma d'un enroulement imbriqué à une section par encoche et à un pas raccourci d'un moteur à quatre pôles.

Cet enroulement est principalement employé dans les moteurs de petite puissance avec encoches permettant de semer par l'entaille, des fils fins ne dépassant pas 2 mm de diamètre sur isolement. Etant donné que les têtes des bobines de ces enroulements sont assez compliquées, leur fabrication avec les gros conducteurs pour moyenne et grande puissance serait très complexe.

Alors, somme toute, comment choisir le genre d'enroulement ? Quel est le critérium qui peut permettre un choix judicieux de l'enroulement pour un cas déterminé ?

Dans le cas d'encoches ouvertes, pour toutes valeurs de N_1 et pour toutes les polarités, il est indiqué d'employer l'enroulement imbriqué à deux sections par encoche.

Avec les encoches semi-fermées permettant de semer des fils ronds par l'entaille, on utilisera soit l'enroulement imbriqué à deux sections par encoche (mais seulement avec N_1 impair), soit l'enroulement imbriqué à une section par encoche.

Finalement avec les encoches fermées ou semi-fermées dont les entailles ne sont pas suffisamment larges pour permettre de semer par l'entaille, il faut employer l'enroulement concentrique : avec trois nappes pour moteurs à deux pôles et à deux nappes pour moteurs à quatre pôles et plus. Leur exécution peut être faite par "enfilade" ou en brasant les conducteurs bout à bout.

L'enroulement imbriqué est surtout employé pour les moteurs à basse tension de petite et de moyenne puissance. Cet enroulement permet de mettre dans chaque encoche jusqu'à cinq fils en parallèle, semés par l'entaille, et si cela ne suffit pas on couple des groupes en parallèle de façon à avoir autant de circuits qu'il y a de paires de pôles.

D'ailleurs, ce couplage permet d'obtenir une répartition uniforme de l'attraction magnétique entre le stator et le rotor, car tous les circuits, étant soumis à la même tension, donnent le même flux, indépendamment de la grandeur de l'entrefer. Le couplage en parallèle est surtout important pour les gros moteurs à faible vitesse où il faut éviter toute inégalité dans l'attraction magnétique.

On rencontre aussi des enroulements avec encoches " semi-ouvertes " dont l'entaille est asymétrique(fig.25) et de largeur un peu plus grande que la moitié de l'encoche. Cette disposition réunit les avantages des encoches ouvertes (mise en place de sections facile) et des encoches semi-fermées (fig.26), dont l'entaille relativement étroite, agit favorablement sur les caractéristiques électro-magnétiques des moteurs.

Comme on a deux barres par section, on a quatre couches d'isolement et la section utile d'encoche n'est pas très grande.

Pour cette raison, on ne préconise ce genre d'enroulement que pour les moteurs à basse tension.

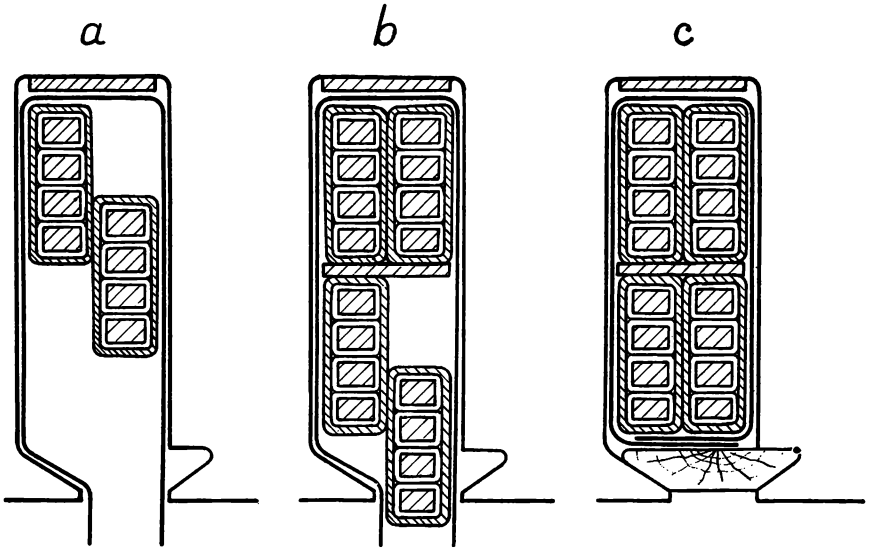


Fig.25 - Mise en place de côtés de sections roulées rigides dans une encoche semi-fermée.

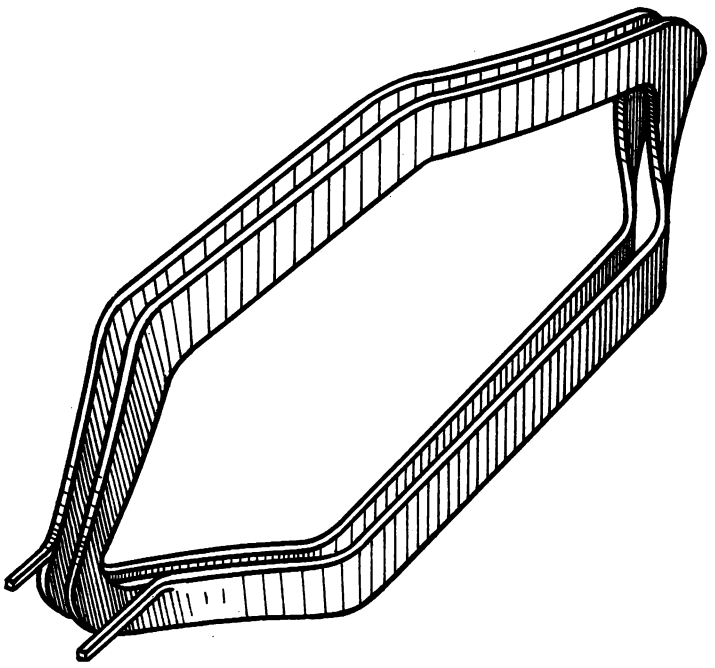


Fig.26 - Section statorique pour encoches semi-fermées.

Chapitre 5

ENROULEMENTS ROTORIQUES

On utilise dans les rotors bobinés presque exclusivement l'enroulement ondulé à barres. Les encoches rotoriques ont des entailles très étroites, ne permettant pas de semer par l'entaille. De plus, bien que les enroulements rotoriques soient sans exception à basse tension, leur tension n'est pas normalisée, ce qui permet de choisir un nombre de spires tel qu'il soit favorable à la mise en place des sections.

L'enroulement concentrique "par enfilade" est parfois utilisé pour les rotors de petite puissance, mais seulement en cas d'extrême nécessité, parce qu'on ne dispose pas en général d'assez de place pour loger les têtes de ces bobines et qu'en plus, le frettage présente de grandes difficultés.

Cette exécution n'est recommandée que pour un nombre pair de pôles. Avec un nombre impair, on aurait des sections "mixtes" qui compromettraient l'équilibre dynamique du rotor.

Les enroulements rotoriques sont donc le plus souvent constitués de demi-sections en barres, dont une des têtes seulement est pliée sur forme.

On fait glisser ces demi-sections dans les encoches et ensuite on forme les autres têtes sur place.

Les demi-sections sont connectées entr'elles par des chapes découpées dans des tubes minces en cuivre et le tout est consolidé par soudure.

Généralement on tâche d'avoir un nombre entier d'encoches par pôle et par phase.

En ce qui concerne le pas, on le prend entier afin d'avoir dans chaque encoche des demi-sections de même phase. La fig.27 représente un schéma d'enroulement à 4 pôles et avec $q_1 = 3$. Chaque phase est constituée de deux parties.

Il est facile de se rendre compte, en suivant le fil dans un sens bien déterminé, qu'on a d'abord trois pas entiers,

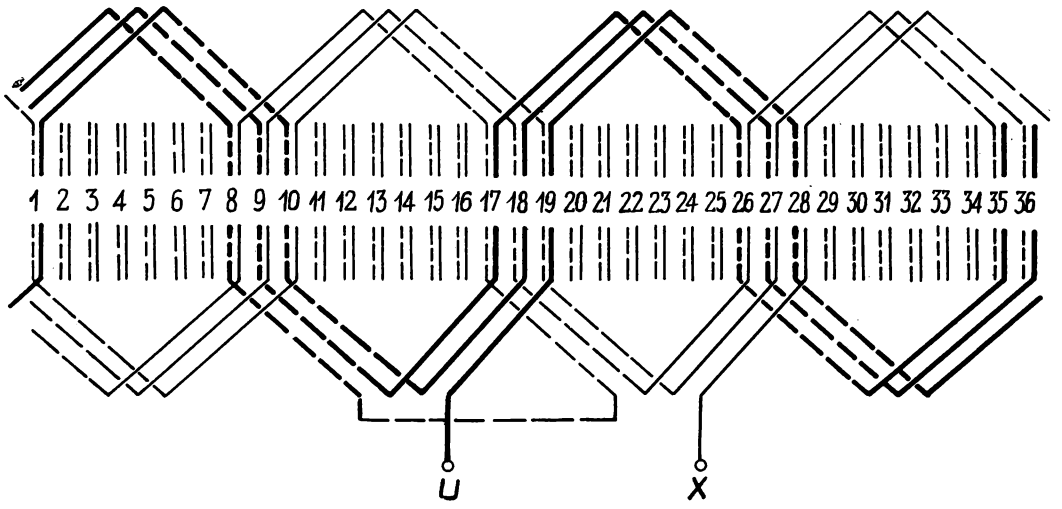


Fig.27 – Schéma d'un enroulement rotorique ondulé à 4 pôles et 3 encoches par pôle et par phase.

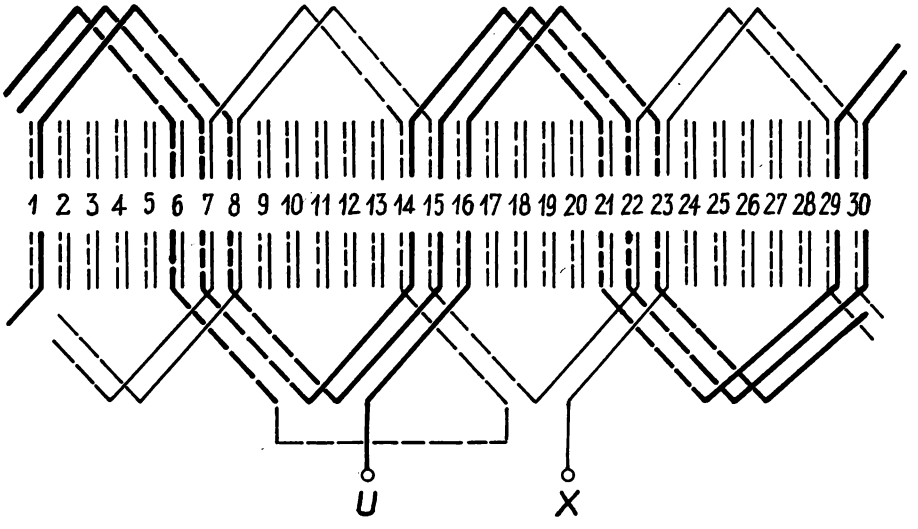


Fig.28 – Schéma d'un enroulement rotorique ondulé à 4 pôles et 2,5 encoches par pôle et par phase.

$2p - 1 = (2 \times 2) - 1 = 3$ $y = 3 q_2 = 3 \times 3 = 9$ suivi d'un pas raccourci d'une unité $y' = 3q_2 - 1 = (3 \times 3) - 1 = 8$.

On utilise un pas raccourci parce que, si le dernier pas était également entier, l'enroulement serait fermé sur lui-même après un tour, tandis qu'avec un pas raccourci, on recommence un nouveau tour après avoir parcouru $(2p - 1) = 3$ pas entiers et un pas raccourci.

Après $q_2 = 3$ tours on passe à la seconde partie de l'enroulement, mais en sens inverse. Bien que la chose soit possible, il n'est pas indiqué de prendre un pas allongé au lieu de raccourcir parce que avec $y = 3 q_2 + 1$, par exemple, l'encombrement des têtes serait trop grand.

En cas de nécessité, on peut mettre en parallèle les deux parties d'enroulement de chaque phase, en respectant le sens des courants. Cette nécessité se présente dans les moteurs à grande puissance afin de réduire de moitié la tension entre les bagues collectrices. La valeur de courant par bague devient donc double et il y a lieu de vérifier la densité de courant dans les balais.

L'enroulement rotorique peut aussi être réalisé avec q_2 fractionnaire, généralement du type

$$q_2 = n + 0{,}5$$

où n est un nombre entier quelconque. Mais cet enroulement se rencontre rarement.

La fig.28 représente l'enroulement d'un moteur à 4 pôles et avec $q_2 = 2{,}5$

Le pas d'un tel enroulement ne peut pas être entier. En effet, $3 q_2 = 3n + 1{,}5$ est essentiellement fractionnaire.

On est obligé de donner au pas avant et arrière alternativement les valeurs entières, immédiatement supérieures et inférieures à $3 n + 1{,}5$ c.à.d. : $3 n + 2$ et $3 n + 1$.

Les enroulements des moteurs avec rotors en court-circuit, dits "à cages" sont très simples. Ces cages presque indestructibles, peuvent être facilement reconstituées et réparées. D'autre

part, leur modification éventuelle ne peut que nuire aux caractéristiques primitives. Leur modification ne sera pas envisagée.

Toutefois, après avoir modifié le couplage d'un stator ou après avoir changé de type d'enroulement, il est bon de contrôler les caractéristiques rotoriques. En effet, il ne faut pas perdre de vue que la densité de courant par bague ne doit pas dépasser la limite pour laquelle le moteur a été conçu.

De même, la tension entre bagues à l'arrêt ne doit pas dépasser une limite admissible pour les isolants du collecteur et l'écartement entre bagues.

L'intensité de courant rotorique peut être calculée par la formule :

$$I_2 = I_1 \times \lambda \times \cos \varphi \qquad (13)$$

où I_1 est l'intensité de courant statorique et λ le rapport de transformation. Ce dernier peut être déterminé soit par mesure, soit par calcul direct. Si avant modification on a pu relever :
- le rapport de transformation λ,
- les nombres de spires en série par phase n_1,
- le coefficient de bobinage f_1,

et si après modification le nombre de spires par phase et le coefficient de bobinage sont devenus n_1' et f_1', le nouveau rapport de transformation du moteur, dont le stator seul a été modifié, sera :

$$\lambda' = \lambda \frac{n_1' \times f_1'}{n_1 \times f_1}$$

Pour un calcul direct, il est indispensable de connaître la spécification de l'enroulement rotorique pour trouver le rapport de transformation :

$$\lambda = \frac{n_1 \times f_1}{n_2 \times f_2}$$

Le cos φ peut être estimé avec une approximation suffisante. Voir à cet effet les tableaux 26 et 27.

La tension rotorique entre bagues à l'arrêt est donnée par la formule :

$$E_b = \frac{U \text{ stator en ligne}}{\lambda \times c}$$

où c est un coefficient de chute de tension, dont l'ordre de grandeur est de 1,025. On peut utiliser ce chiffre sans commettre une très grande erreur.

On ne doit pas perdre de vue, lorsqu'un moteur à rebobiner où à modifier est destiné à être utilisé en freinage à contre courant, que les bagues collectrices et les balais seront soumis momentanément à une tension et à une intensité double des valeurs normales.

Le contrôle des tensions et courants maximum au collecteur devra donc se faire dans chaque cas en tenant compte des conditions particulières envisagées.

Chapitre 6

SCHEMAS D'ENROULEMENTS

Il ne suffit pas de choisir un type de bobinage, de calculer le nombre de spires et la section du conducteur d'un enroulement, il faut encore établir un schéma à l'aide duquel un bobineur doit pouvoir exécuter les connexions entre sections distinctes pour former un ensemble cohérent.

On commence par numéroter les encoches, de préférence de gauche à droite. Puis il faut procéder à la répartition des encoches entre phases.

Examinons comment on effectue cette répartition dans le cas d'un nombre entier d'encoches par pôle et par phase.

Pour un enroulement concentrique à une section par encoche, cette répartition est la plus simple : il suffit à cet effet de réserver pour chaque phase "q_1" encoches et ceci à partir de l'encoche numéro 1.

Pour un enroulement imbriqué à deux sections par encoche, on procède de la même façon, on effectue d'abord la répartition des encoches dans la couche supérieure puis celle de la couche inférieure, mais en commençant par une encoche portant numéro $y + 1$.

Pour un enroulement imbriqué à une section par encoche, il faut occuper pour la première phase, toutes les encoches impaires, dont les numéros sont égaux ou plus petits que q_1. On répète la même opération sur chaque paire de pôles suivante en ajoutant chaque fois 6 q_1 aux numéros des encoches déjà occupées. Par exemple, si $q_1 = 3$, on réserve pour la première phase les encoches 1 et 3, et puis on ajoute 6 $q_1 = 6 \times 3 = 18$, ce qui donne $1 + 18 = 19$ et $3 + 18 = 21$, ensuite on ajoute $2 \times 6\ q_1 = 2 \times 6 \times 3 = 36$ ce qui donne $1 + 36 = 37$ et $3 + 36 = 39$ et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on ait parcouru toute la circonférence.

Suivant que q_1 est pair ou impair, on continuera de la façon suivante :

Si q_1 est pair, on réserve toutes les encoches dont les numéros sont plus grands que ceux des encoches occupées par 3 q_1, et

si q_1 est impair, on réserve les encoches dont les numéros sont : $3\ q_1 + n$, $9\ q_1 + n$, $15\ q_1 + n$, etc. où n est pair et en même temps plus petit que q_1.

Dans notre exemple ces encoches sont :
$(3 \times 3) + 2 = 11$; $(9 \times 3) + 2 = 29$; $(15 \times 3) + 2 = 47$ etc.

De cette façon on réservera $N_1/6$ encoches pour toutes les sections de la première phase, mais seulement pour un et toujours le même côté de chaque section : soit pour le côté supérieur, soit pour le côté inférieur.

Cette phase n'étant pas complétée, pour en finir il suffit de réserver pour toute encoche occupée, une autre, éloignée d'un pas qu'on a choisi pour cet enroulement. Ces encoches doivent recevoir les seconds cotés de toutes les sections de la première phase.

Dans notre cas pour pas $y = 7$, ces encoches auront pour numéros : $1 + 7 = 8$; $3 + 7 = 10$; $11 + 7 = 18$; $19 + 7 = 26$; $21 + 7 = 28$; $29 + 7 = 36$; $37 + 7 = 44$; $39 + 7 = 46$; $47 + 7 = 54$; etc.

Les numéros des encoches de la deuxième phase, indistinctement du genre d'enroulement, s'obtiennent en ajoutant $2\ q_1$ aux numéros des encoches de la première phase.

Pour la troisième phase il faut ajouter $4\ q_1$ aux numéros des encoches de la première phase. Dans notre cas, la mise en place de la deuxième phase doit se faire à partir de l'encoche numéro $2\ q_1 + 1 = (2 \times 3) + 1 = 7$ et la troisième phase à partir de l'encoche numéro $4\ q_1 + 1 = (4 \times 3) + 1 = 13$.

Toutes les encoches étant réparties entre les phases, il y a lieu de compléter ce schéma par le tracé des têtes, conformément au genre d'enroulement adopté et en respectant les connexions entre les encoches suivant le pas d'enroulement choisi.

Finalement, il y a lieu de tracer les connexions entre les sections, selon le couplage choisi : c.à.d. en série ou en parallèle. Dans tous les cas, les conducteurs des sections appartenant à un espace polaire doivent toujours être parcourus dans le même sens. Simultanément on choisit l'emplacement d'entrées et de sorties.

Dans le couplage en série on peut créer l'entrée et la sortie d'une phase en coupant une connexion quelconque entre les deux groupes de section. On doit exploiter cette possibilité et choisir cette coupure aussi près que possible de la planchette à bornes pour que les connexions soient plus courtes et moins encombrantes.

Pour éviter une fausse succession de phases qui peut être occasionnée lors d'une confusion de l'entrée et de la sortie, il y a lieu d'adopter la règle de contrôle suivante : les entrées (ainsi que les sorties) de toutes les phases doivent être éloignées l'une de l'autre de 2 q_1 encoches.

Lorsqu'on a des circuits en parallèle, cette règle est applicable à un circuit de chaque phase.

Entre deux combinaisons : deux circuits en parallèle ou deux fils en parallèle par conducteur, on doit de préférence choisir les deux fils en parallèle. Toutefois, parfois on est obligé de prendre par exemple 14,5 conducteurs par encoche pour respecter les caractéristiques, donc prendre 29 conducteurs avec les deux circuits en parallèle. On a toujours l'avantage de prendre moins de circuits en parallèle que possible, parce que d'une part cela demande moins de connexions et une tension plus petite entre spires. Aussi pour des petits moteurs il est préférable de prendre le montage en étoile, vu que la tension par phase est moindre. Les moteurs de petite puissance, de 0,3 à 1 kW par exemple, nécessitent pour 380 V en triangle, un fil très fin de dimension spéciale, ce qui rend l'exécution de l'enroulement très précaire. Les caractéristiques de ce moteur sont moins bonnes que celles du moteur 220/380 V ayant la même encoche. Comme ces moteurs ne sont normalement pas utilisés avec les démarreurs étoile-triangle, on a intérêt à les remplacer par le moteur à 380 V étoile.

La distribution d'encoches entre phases avec q_1 fractionnaire est plus compliquée qu'avec q_1 entier.

Pour l'enroulement concentrique à une section par encoche, on prend pour nombre de sections d'un groupe de chaque phase, à tour de rôle, les deux chiffres entiers entre lesquels se situe le nombre q_1 fractionnaire.

Par exemple si $q_1 = 2,5$ on prend $q_1 = 2$ et $q_1 = 3$.

C'est pourquoi la distribution d'encoches entre les phases

doit être effectuée comme suit : on commence avec l'encoche numéro 1. On réserve pour la première phase autant d'encoches que l'indique la plus grande valeur de q_1.

Puis, pour la troisième et deuxième phase, on réserve le nombre d'encoches correspondant à la petite valeur de q_1 et encore pour la première et troisième phase la grande valeur de q_1 etc.

211 - 221 - 122 - 112 - etc..

de sorte qu'avec q_1 = 1,5 la distribution se présente comme au tableau 5. Le tracé des têtes de bobines et de connexions ne presente pas de difficultés.

TABLEAU N° 5

Première phase	2	–	–	2	–	–	1	–	–	1	–	–	2
Deuxième phase	–	–	1	–	–	1	–	–	2	–	–	2	–
Troisième phase	–	1	–	–	2	–	–	2	–	–	1	–	–

Pour élaborer un schéma d'enroulement à deux sections par encoche et avec q_1 fractionnaire, on peut appliquer le procédé ci-après: cette méthode permet à l'aide d'un tableau de grouper les bobines de telle façon que la tension entre les phases soit rigoureusement la même et que l'angle entre les phases soit mathématiquement exact.

La méthode est basée sur le raisonnement suivant.

Avec un nombre de paires de pôles quelconque, non divisible par 3, on obtient trois phases égales, si le nombre d'encoches est divisible par trois. Si le nombre de paires de pôles est un multiple de 3, il faut que le nombre d'encoches N_1 soit divisible par 3 × 3. Si le nombre de paires de pôles contient deux fois le facteur 3, il faut que le nombre d'encoches le contienne 3 fois aussi et ainsi de suite. Sans cela il est impossible d'obtenir un enroulement complètement équilibré. Ayant ainsi constaté qu'un enroulement équilibré est possible, on détermine la position des groupes inégaux d'après le tableau 6.

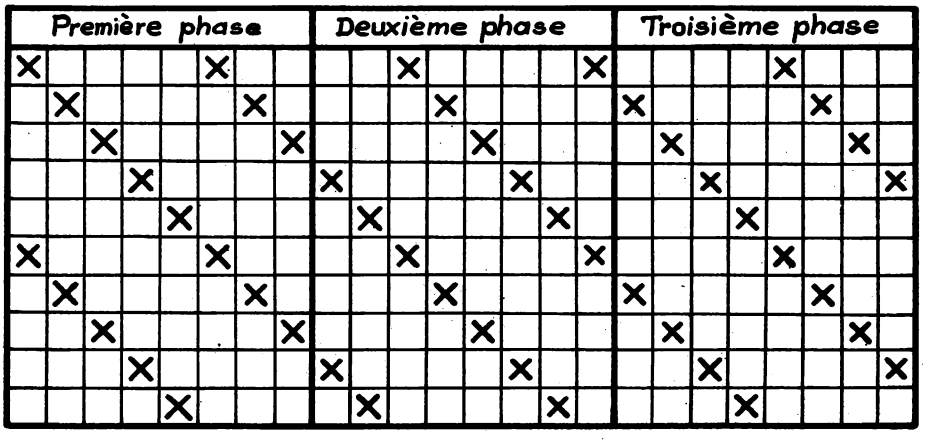
On se basera sur les deux principes suivants :

Il faut déterminer les deux nombres :
a) nombre total d'encoches qui reçoivent un enroulement;
b) produit du nombre de phases par le nombre de pôles.

Puis il faut calculer le plus petit commun multiple de ces deux nombres, soit par exemple, un enroulement triphasé avec $2p$ - 10 pôles et N_1 - 48 encoches. Les deux nombres de base sont alors 48 et 30. Maintenant $48 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 3$ et

$$30 = 2 \times 3 \times 5$$

TABLEAU N° 6



Le plus petit commun multiple sera 240, parce que 2 × 3 du nombre 30 entre déjà dans la formation de 48, mais 5 ne figure pas.

On obtient le plus petit commun multiple en multipliant 48 par un chiffre qui lui manque dans le produit 30, c.à.d. par 5. Donc cela sera 48 × 5 = 240.

Au tableau 6 on représentera une encoche par un nombre de n carrés :

$$n = \frac{\text{plus petit commun multiple}}{N_1} = \frac{240}{48} = 5$$

Sous un pôle, chaque phase sera représentée par $\frac{240}{30}$ = 8 carrés.

On comptera donc horizontalement 8 carrés par phase, en tout 3 × 8 = 24 carrés horizontaux et 10 carrés verticaux pour représenter 10 pôles. Commençant en haut et à gauche on met une croix dans le premier carré. Cette croix représente la première bobine de la première phase. Le tableau ne montre qu'une moitié de chaque bobine; l'autre côté est déterminé dans chaque cas par le pas d'enroulement. On a vu que 5 carrés valent une encoche. On comptera donc 5 carrés vers la droite et on mettra une croix dans le sixième carré et ainsi de suite. On comptera ainsi jusqu'à ce que le tableau complet soit rempli.

De la fin du premier pôle, on continue sur le commencement du deuxième pôle, comme s'il n'y avait pas d'interruption. On voit ainsi que la première phase contient deux bobines sous le premier pôle, deux sous le deuxième et ainsi de suite. Du sixième au dixième pôle, le même arrangement se répète. Il s'en suit qu'une mise en parallèle est possible. Si le même arrangement s'est répété quatre fois, on aurait pu faire quatre circuits en parallèle.

Pour qu'un nombre déterminé de circuits parallèles soit possible, il faut que ce nombre, multiplié par le nombre de phases, soit multiple du nombre d'encoches et que ce même nombre soit également multiple du nombre de pôles. Le plus grand nombre de circuits en parallèle sera le plus grand commun multiple du nombre d'encoches N_1 et du nombre de pôles $2p$.

Le tableau 7 contient toutes les possibilités d'enroulement pour un nombre de pôles allant jusqu'à 36 et un nombre d'encoches allant jusqu'à 162. Dans ce tableau, la lettre *e* veut dire qu'un enroulement équilibré avec un même nombre de bobines dans chaque groupe est possible. La lettre *o* veut dire qu'un enroulement complètement équilibré quant à la tension et aux phases n'est pas possible. Le chiffre *1* veut dire qu'un couplage en série avec des groupes inégaux est possible. Tout autre chiffre indique le plus grand nombre de circuits parallèles avec des groupes inégaux.

TABLEAU N° 7

NOMBRE DE POLES

	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
12	e	e																
15	1	1																
18	e	2	e															
21	1	1	0															
24	e	e	0	e														
27	1	1	3	1														
30	e	2	0	2	e													
33	1	1	0	1	1													
36	e	e	e	4	2	e												
39	1	1	0	1	1	0												
42	e	2	0	2	2	0												
45	1	1	3	1	5	3	1											
48	e	e	0	e	2	0	2	e										
51	1	1	0	1	1	0	1	1										
54	e	2	e	2	2	0	2	2	e									
57	1	1	0	1	1	0	1	1	0									
60	e	e	0	4	e	0	2	4	0	e								
63	1	1	3	1	1	3	7	1	0	1								
66	e	2	0	2	2	0	2	2	0	2	e							
69	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1							
72	e	e	e	e	2	e	2	8	0	4	2	e						
75	1	1	0	1	5	0	1	1	0	5	1	0						
78	e	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0						
81	1	1	3	1	1	3	1	1	9	1	1	3	1					
84	e	e	0	4	2	0	e	4	0	4	2	0	2	e				
87	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1				
90	e	2	e	2	e	6	2	2	0	10	2	6	2	2	e			
93	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0			
96	e	e	0	e	2	0	2	e	0	4	2	0	2	4	0	e		
99		1	3	1	1	3	1	1	0	1	11	2	1	1	9	1		
102	e	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0	2	e	
105	1	1	0	1	5	0	7	1	0	1	1	0	0	1	7	0	1	
108	e	e	e	4	2	e	2	4	e	4	2	12	2	4	6	4	2	e
111	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
114	e	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0
117	1	1	3	1	1	3	1	1	0	1	1	3	13	1	3	1	1	0
120	e	e	0	e	e	0	2	8	0	e	2	0	2	4	0	8	2	0
123	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
126	e	2	e	2	2	6	e	2	0	2	2	6	2	14	6	2	2	0
129	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
132	e	e	0	4	2	0	2	4	0	1	e	0	2	4	0	4	2	0
135	1	1	3	1	5	3	1	1	0	1	1	3	1	1	15	1	1	9
138	e	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0
141	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
144	e	e	e	e	2	e	2	e	0	4	2	e	2	4	6	16	2	0
147	1	1	0	1	1	0	7	1	0	1	1	0	1	7	0	1	1	0
150	e	2	0	2	e	0	2	2	0	10	2	0	2	2	0	2	2	0
153	1	1	3	1	1	3	1	1	0	1	1	3	1	1	3	1	17	0
156	e	e	0	4	2	0	2	1	0	1	2	0	2	4	0	4	2	0
159	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
162	e	2	e	2	2	6	2	2	e	2	2	6	2	2	6	2	2	18

Tout groupement déterminé par la méthode indiquée donne un enroulement parfaitement équilibré en ce qui concerne la tension et la succession des phases. On peut cependant imaginer d'autres enroulements dans lesquels l'inégalité des tensions ou des angles de phase est tellement petite que la marche de la machine n'en est pas sensiblement affectée. De tels arrangements ne peuvent être obtenus qu'en inserrant ou laissant de côté certaines bobines, de telle façon qu'on obtienne une symétrie raisonnable. La valeur des tensions et la position des phases peuvent dans ce cas être obtenus par voie analytique par les additions de différents vecteurs. La grandeur admissible de l'inégalité dépend essentiellement de l'endroit où elle se produit, du montage de l'enroulement, de la grandeur et du type de la machine.

Ainsi avec des circuits parallèles, l'inégalité des phases et des tensions doit être très petite à cause de la très faible impédance.

Au contraire, avec une connexion en série de toutes les bobines et couplage en étoile, on peut admettre une déviation relativement importante sans redouter pour cela des inconvénients dans le fonctionnement du moteur.

Il y a lieu de mentionner en passant le couplage de phases. Lorsqu'on est libre de choisir le couplage des phases, il est généralement préférable de prévoir le couplage en étoile, si évidemment le démarrage en étoile-triangle n'est pas exigé. Cela simplifie surtout l'exécution des connexions des enroulements à barres de basse tension d'une part et élimine le courant de circulation éventuel d'autre part.

Chapitre 7

TABLE D'ENROULEMENTS

Malgré leur simplicité, les schémas d'enroulements ne se prêtent pas à un tracé rapide et facile. Heureusement le bobinier n'a pas besoin de suivre tous les fils, il se contente de connaître l'ordre dans lequel doivent s'effectuer les connexions entre les sections.

On prévoit à cet effet les tables d'enroulements, portant les numéros de groupes de sections, E désignant l'entrée d'un groupe et S la sortie. L'avantage des tableaux réside dans leur élaboration machinale suivant une méthode précise.

Il est plus simple de dresser un tableau d'un exemple pour se rendre compte du processus. Supposons qu'il s'agisse d'un tableau pour un moteur à quatre pôles avec un enroulement à deux sections par encoche, avec $N_1 = 36$, $q_1 = 3$, $y = 7$ et avec les deux circuits en série (fig.29).

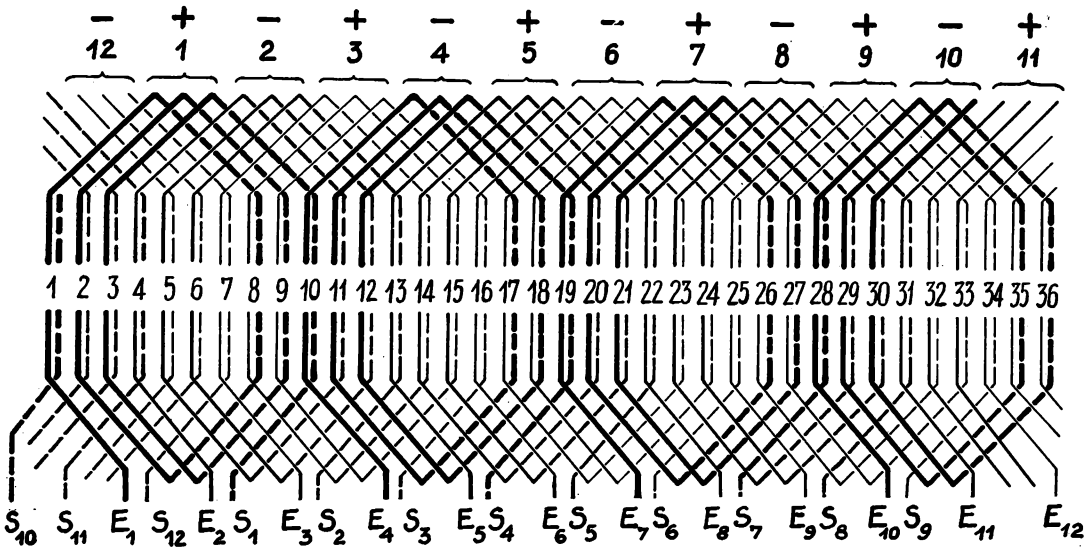


Fig.29 – Numérotation des groupes de sections (Pour connexions complétées voir fig.19).

On commence par numéroter chaque groupe de q_1 - 3 sections du schéma en partant de gauche à droite.

On a $\frac{N_1}{q_1} = \frac{36}{3}$ - 12 groupes de ce genre.

E_1 et S_1 désignent l'entrée et la sortie respectivement du groupe 1. E étant toujours une entrée du côté de la section le plus proche de l'entrefer et S étant toujours une sortie du côté de la section se trouvant au fond de l'encoche.

On représente des connexions entre les groupes par des traits droits. Il est préférable de disposer les entrées de toutes les phases d'enroulements statoriques aussi près que possible les unes des autres pour faciliter les raccordements à la plaque à bornes, de sorte que, si l'entrée de la première phase se fait par le groupe N°1, pour q_1 entier, l'entrée de la deuxième phase se fait par l'encoche du groupe N°3, écartée de $2\ q_1 = 2 \times 3 = 6$ encoches de l'entrée de la première phase. De même l'entrée de la troisième phase se fait par l'encoche du groupe N°5, écartée de $4\ q_1 = 4 \times 3 = 12$ encoches de l'entrée de la première phase.

Si nous marquons chaque groupe pair du signe + et chaque groupe impair du signe -, on verra que l'entrée de la deuxième phase peut se faire par tout groupe quelconque écarté d'un nombre d'encoches multiple de $2\ q_1 = 6$, soit par groupe 5 (encoche 13), soit par groupe 7 (encoche 19) etc...

Dans ce cas, l'entrée de la troisième phase sera écartée de l'entrée de la première phase, d'un nombre double d'encoches de celles de la deuxième phase.

En partant de ce principe on peut dresser pour chaque phase un tableau (fig.30).

Donc, si les entrées de trois phases sont prévues en E_1, E_3 et E_5, on peut écrire automatiquement les numéros d'autres groupes qu'on doit coupler en série avec groupes : E_1S_1 - E_3S_3 - et E_5S_5.

C'est ainsi qu'on a pour la première phase :

1 + 3 = 4, 4 + 3 = 7, 7 + 3 = 10 et on obtient le schéma fig.30.

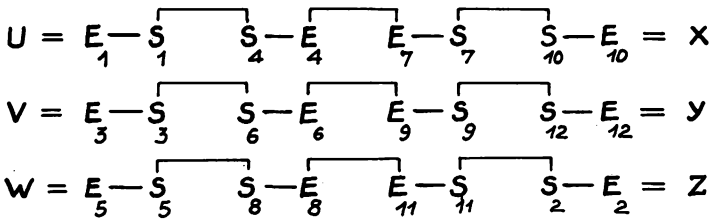


Fig.30 – Schéma de bobinage pour les groupes de sections connectés en série.

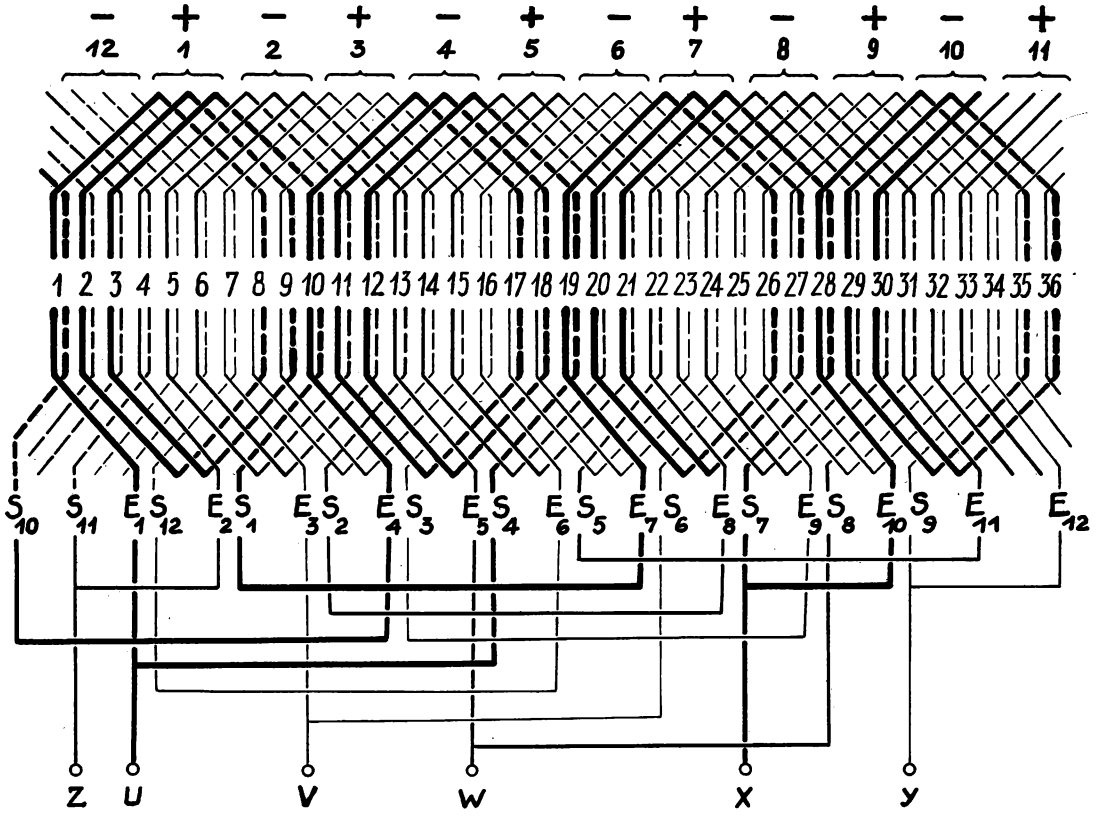


Fig. 31 – Schéma d'un enroulement imbriqué à deux sections par encoche pour un moteur à 4 pôles, 3 encoches par pôle et par phase et deux circuits en parallèle.

Le deuxième groupe est écrit S_4E_4 et pas E_4S_4 pour indiquer qu'il y a lieu de connecter S_1 avec S_4 pour former un pôle voisin de signe contraire.

Chaque ligne du tableau représente un circuit en série et chaque groupe représente un pôle.

Supposons qu'on veuille dresser le même tableau mais pour les deux circuits en parallèle (schéma de la fig.31).

Le tableau de la fig.30 peut servir mais il y a lieu de changer les connexions entre les groupes de bobines en les mettant en parallèle. Il semblerait à première vue, qu'il est plus simple de prendre pour un des circuits parallèles, deux groupes les plus proches en les connectant en série et puis réunir les entrées et les sorties des circuits ainsi formées. Par exemple, dans la première phase il fallait pour cela connecter :

$E_1 - S_1$ et $S_4 - E_4$ d'une part et E_7S_7 et $S_{10}E_{10}$ d'autre part, comme il est indiqué sur la fig.32.

Mais dans les moteurs asynchrones on déconseille de former un branchement de circuits en parallèle des groupes de sections situés l'un à côté de l'autre. Il faut tâcher de réaliser des connexions de sorte que tous les groupes de sections d'un branchement soient disposés régulièrement sur la périphérie d'une machine.

Cette façon de faire permet d'éviter un déséquilibre de courants entre les branchements dans le cas où le rotor n'est plus concentrique avec le stator.

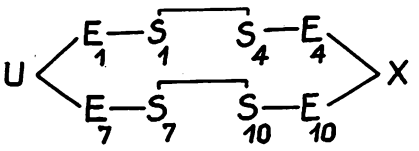


Fig. 32 – Schéma de bobineur avec les groupes de sections mal répartis sur la circonférence.

Ceci peut se présenter, par exemple, lors de l'imprécision de montage ou suite à l'usure des coussinets ou des roulements.

Il faut donc former un branchement avec le premier groupe et le septième groupe de la fig.33 et l'autre branchement avec le quatrième et le dixième groupe, de sorte que chaque branchement forme toujours les pôles de même signe (fig. 34).

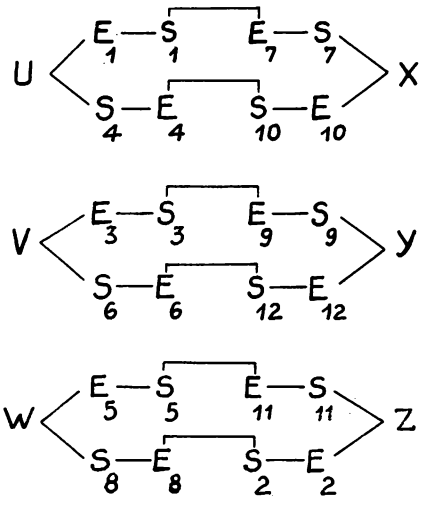


Fig.33 – Schéma de bobineur pour les groupes de sections connectés en parallèle.

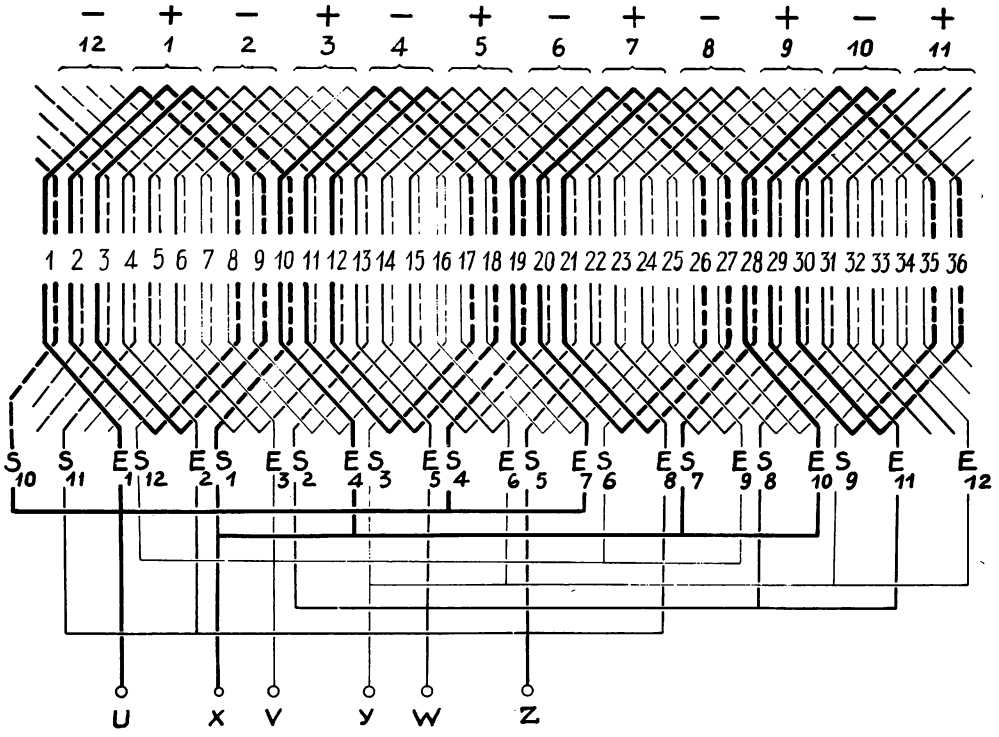


Fig.34 – Schéma d'un enroulement imbriqué à 2 sections par encoche pour un moteur à 4 pôles, 3 encoches par pôle et par phase et 4 circuits en parallèle.

Dans certains cas on est obligé d'utiliser le nombre de circuits le plus grand possible. Dans le cas extrême chaque branchement comporte seulement un groupe de sections (fig.35).

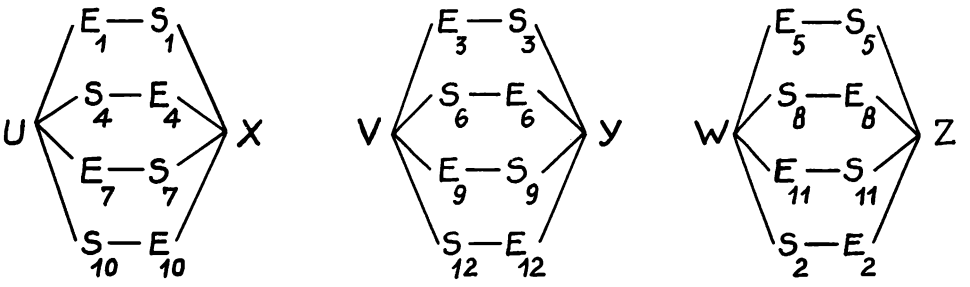


Fig.35 – Schéma de bobineur pour l'enroulement de la fig.34.

Cette combinaison ne peut être considérée comme heureuse parce que dans le cas éventuel d'inégalité d'entrefer, un branchement entier se place en face de l'entrefer, dont la valeur diffère sensiblement de la valeur moyenne. C'est pourquoi on ne doit employer le nombre de branchements maximum que dans le cas extrême.

En ce qui concerne les enroulements rotoriques, leurs tableaux sont très faciles à élaborer.

Examinons par exemple comment composer un tableau pour un moteur à quatre pôles avec un enroulement ondulé avec trois encoches par pôle et par phase, représenté par la fig.27.

L'entrée *U* de la première phase se trouve dans la section extérieure de l'encoche 1. Elle doit être connectée avec la section inférieure se trouvant dans l'encoche, dont le numéro s'obtient en ajoutant au numéro 1 le pas d'enroulement qui est dans ce cas 9, donc ce numéro est 10. Faisant encore le même pas, l'enroulement s'introduit dans la section extérieure de l'encoche 19, puis dans l'encoche 28.

Le dernier pas de ce parcours doit être égal à $p - 1 = 9 - 1 = 8$, donc l'enroulement entre dans la section extérieure de l'encoche 36. Là commence le deuxième tour d'enroulement. Il y a toujours q tours (dans notre cas 3) ce qui définit la première moitié de cette phase. On procède de la même façon avec les autres phases mais pour cela il faut fixer la disposition de leurs entrées.

Contrairement à ce qu'on tâche de réaliser dans les enroulements statoriques, en rapprochant aussi près que possible les entrées de toutes les phases, dans les enroulements rotoriques on est amené à prendre d'autres dispositions.

L'espace disponible est souvent limité et il n'est pas commode d'entasser les connexions et les sorties. D'autre part, l'accumulation des masses formées par les sorties et les connexions rend l'équilibrage dynamique des rotors très onéreux. Aussi doit-on disposer les entrées des phases en les écartant le plus possible l'une de l'autre, surtout dans des petits rotors des moteurs à petit nombre de pôles.

On peut disposer les entrées de phases d'une façon régulière sur la circonférence c.à.d. à 120° l'une par rapport à l'autre pour tous les nombres de pairs de pôles, non multiples de trois. Donc l'entrée de la deuxième phase peut être logée dans l'encoche dont le numéro est :

$$\frac{N_2}{3} + 1 = \frac{36}{3} + 1 = 13$$

et l'entrée de la troisième phase dans l'encoche dont le numéro est :

$$\frac{2N_2}{3} + 1 = \frac{2\times 36}{3} + 1 = 25$$

Les tables pour les premières moitiés de la deuxième et de la troisième phase s'obtiennent en ajoutant au numéro d'encoches de la première phase le 12 et le 24 respectivement et on a la *Fig.36.*

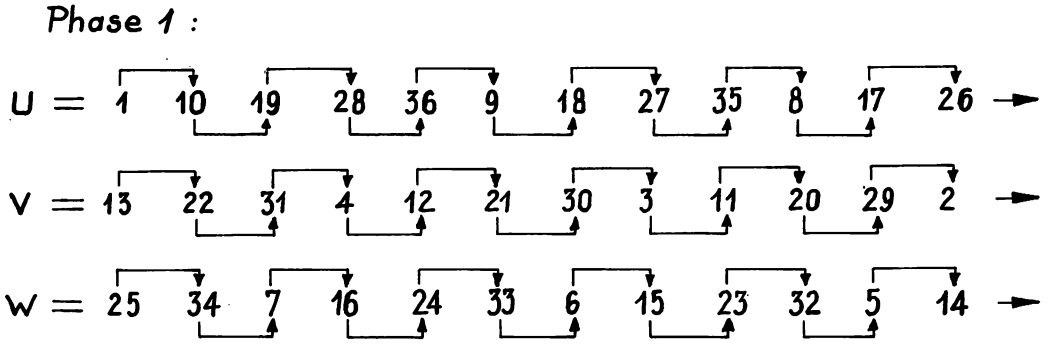


Fig. 36

Il faut ensuite choisir l'endroit pour la fin de la seconde moitié de la première phase.

Comme son parcours s'effectue dans le sens contraire, on doit loger sa fin d'une façon analogue à l'entrée de la première moitié, c.à.d. dans la partie extérieure d'une encoche. D'autre part, on doit choisir cette encoche aussi près que possible de l'encoche recevant l'entrée de la première moitié, afin de réaliser la connexion entre les deux moitiés de la phase. Cet endroit se trouve dans la partie extérieure de l'encoche portant le numéro qui diffère du numéro de l'entrée de la première moitié de $3\ q_2 - 9$ dans le sens rétrograde ou dans le sens progressif. Ceci donne les encoches 10 et 28.

En choisissant l'encoche numéro 10 et en ajoutant aux numéros d'encoches des premières moitiés de phases le chiffre 9, on obtient des tableaux pour les secondes moitiés de trois phases, suivant la fig.37.

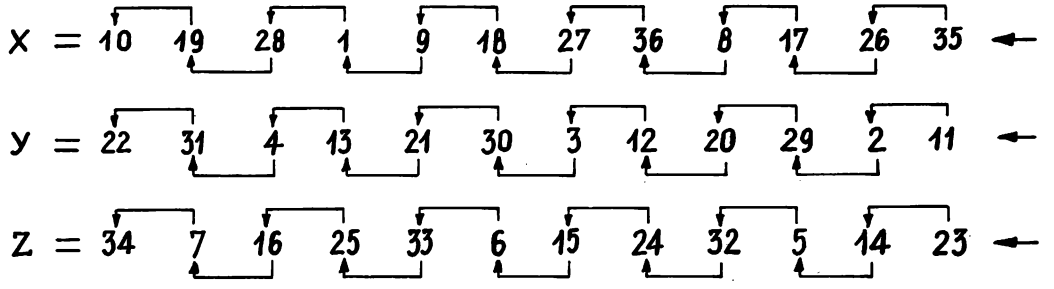


Fig. 37

Il suffit donc de réunir les deux tableaux et de connecter les deux moitiés de chaque phase c.à.d. la barre intérieure de l'encoche 26 avec la barre intérieure de l'encoche 35, pour la première phase, la barre intérieure 2 avec la barre intérieure 11 de la deuxième phase et finalement la barre intérieure 14 avec la barre intérieure 23 de la troisième phase.

Lorsque le nombre de pôles $2p$ est multiple de trois, il n'est plus possible de répartir les entrées ainsi que les sorties de trois phases d'une façon régulière sur la circonférence, parce

que les encoches disposées à 120° l'une de l'autre appartiendront toujours à la même phase. Dans ce cas, on disperse les entrées de phases aussi écartées que possible l'une de l'autre.

Il y a lieu de noter que cette disposition n'étant pas complètement régulière, peut provoquer un déséquilibrage électrique du rotor.

L'usage de tableaux peut être appliqué avec le même succès aux enroulements avec les nombres fractionnaires d'encoches par pôle et par phase. D'abord on construit un tableau auxiliaire pour un enroulement avec un des nombres entiers q_1, supérieur ou inférieur entre lequel se situe le nombre q_1 fractionnaire donné.

Lorsque, par exemple, on demande de dresser un tableau pour un enroulement à quatre pôles, avec le $q_1 = 2{,}25$ et avec le pas $y = 5$, on doit commencer par établir un tableau pour $q_1 = 3$ et avec le même pas de $y = 5$.

En numérotant l'entrée d'une section suivant le numéro d'encoche d'entrée et la sortie avec le numéro d'encoche de sortie, on peut représenter la section par les deux numéros. Ainsi le bobinage avec le $q_1 = 3$ et $y = 5$ est représenté par la fig.38.

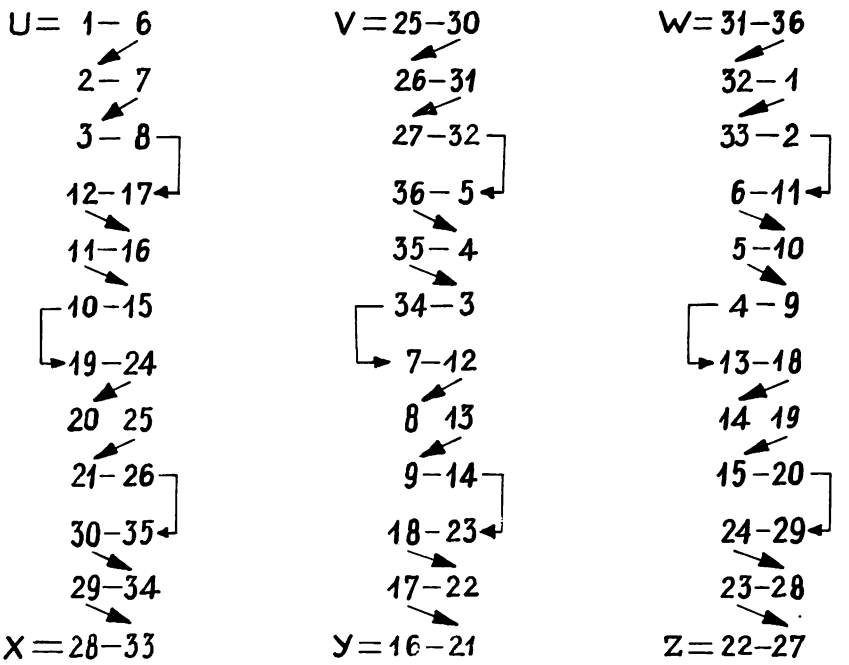


Fig. 38

Comme 3 - 2,25 = 0,75 et comme on a quatre pôles, on doit enlever 0,75 × 4 = 3 sections de chaque phase. Il est commode d'adopter la règle d'enlever toujours la dernière section d'un groupe.

Ainsi on enlève les sections 12-17, 21-16 et 30-35 de la première phase. Afin de respecter la symétrie de l'enroulement, les sections qu'on doit enlever des autres phases doivent être situées à 120° par rapport aux sections enlevées de la première phase. Donc leurs numéros d'encoches doivent être différents de $N_1/3 = 36/3 = 12$ et de $2\,N_1/3 = 72/3 = 24$ de numéros de sections enlevées. Par conséquent, on enlève les sections 36-5, 9-14 et 18-23 de la deuxième phase et les sections 24-29, 32-2 et 6-11 de la troisième phase.

L'aspect du tableau est représenté à la fig.39.

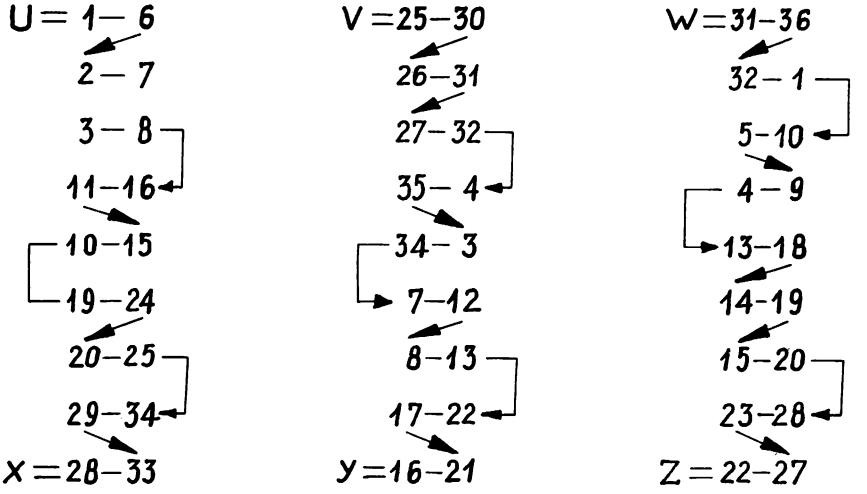


Fig.39

Maintenant il faut dresser un tableau permettant de composer un nouveau numérotage d'encoches. Celà est suffisant pour une couche, la supérieure par exemple.

Cette couche a perdu les numéros : 6, 9, 12, 18, 21, 24, 30, 33 et 36 et ce sont ces numéros qui manqueront dans la rangée servant de correspondance pour un nouveau numérotage.

Les anciens numéros :
1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 34, 35.

Les nouveaux numéros :

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27.

Après quoi il est aisé de transcrire le tableau dans son aspect final de la fig.40.

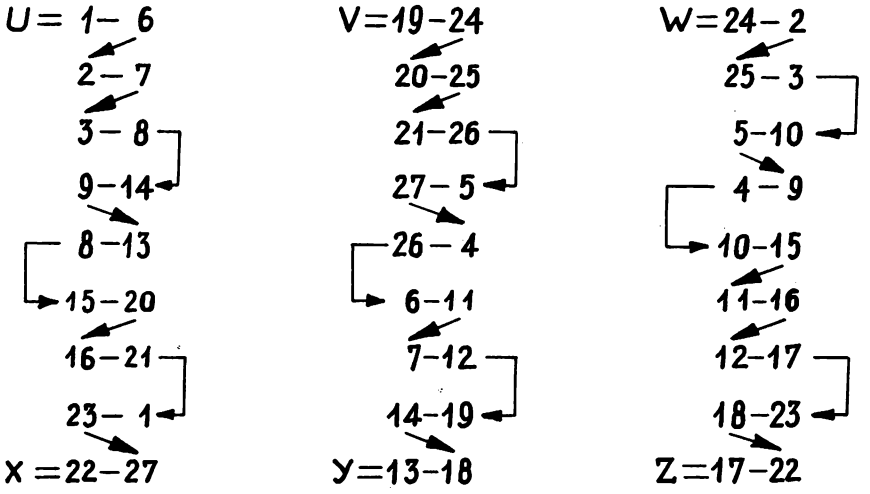


Fig.40

Les tableaux pour les enroulements imbriqués à une section par encoche peuvent être établis de même façon et ceci pour le nombre entier (ainsi que fractionnaire) d'encoches par pôle et par phase.

Toutes les règles exposées ci-dessus sont valables pour l'élaboration de tableaux de ces enroulements, avec cette différence que la couche supérieure d'un enroulement à deux sections par encoche est remplacée par les encoches avec les numéros impairs et la couche inférieure par les encoches avec les numéros pairs.

Chapitre 8

FORCE ELECTROMOTRICE DANS UN ENROULEMENT STATORIQUE

Le champ tournant créé par un enroulement statorique et se déplaçant le long d'alésage du stator n'est pas uniforme dans les limites d'un espace polaire. La densité de ce champ ou l'induction B exprimée en gauss est maximum au milieu de l'espace polaire, elle diminue vers les bords de l'espace polaire, change de direction et de polarité au delà des bords de cet espace polaire. laire.

Pour les applications pratiques, on peut considérer avec une approximation suffisante, que cette répartition des inductions le long de l'alésage est sinusoïdale.

Le champ de ce genre ne change pas sa forme et sa grandeur lors de son déplacement sur la périphérie du stator.

Sa vitesse synchrone est de $N_o = \frac{60 \times f}{p}$ tours par minute.

où p est le nombre de paires de pôles et f est la fréquence du courant qui crée ce champ. Il est admis que l'induction à chaque moment et en tout point de la circonférence est uniforme le long du paquet de tôles délimité par Lf.

La fig.41 représente le développement de l'alésage du stator avec son champ se déplaçant de gauche à droite.

Le champ tournant comme tout champ magnétique est évalué en flux Φ et chiffré en maxwels. Ce flux est d'autant plus grand que l'induction maximum est grande et que la section par laquelle passe ce flux est grande.

Si le champ était uniforme dans une espace polaire, c.à.d. avec la même valeur d'induction B en tous les points, alors le flux Φ pourrait être exprimé en maxwells par le produit de l'induction B et de la section de l'entrefer : $\Phi = B \times S_e$, mais comme l'induction B n'est pas uniforme, il faut trouver sa valeur moyenne dans la section d'entrefer. Dans le cas de la répartition sinusoïdale de l'induction le long de la circonférence avec la valeur maximum B_m et avec la répartition uniforme le long de paquet de tôles, la valeur moyenne de l'induction sera $\frac{\Pi}{2}$ fois plus

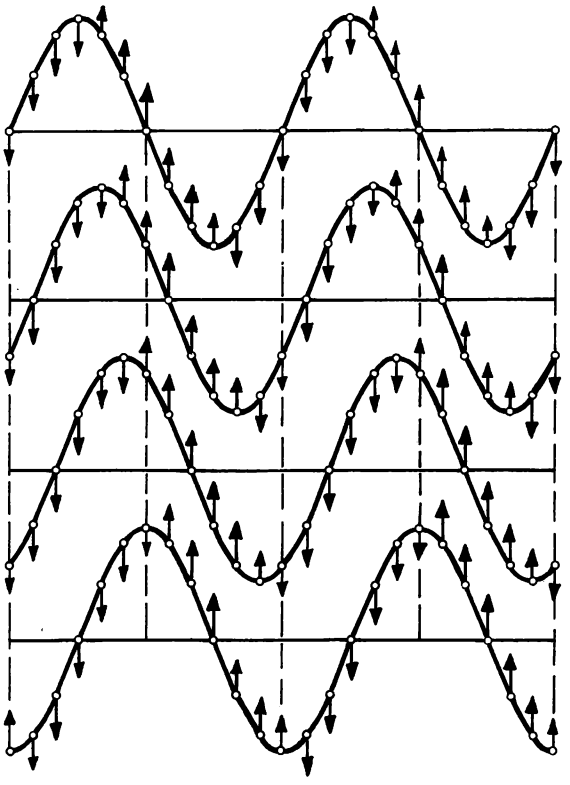


Fig.41 – Déplacement du champ tournant le long de l'alésage du stator.

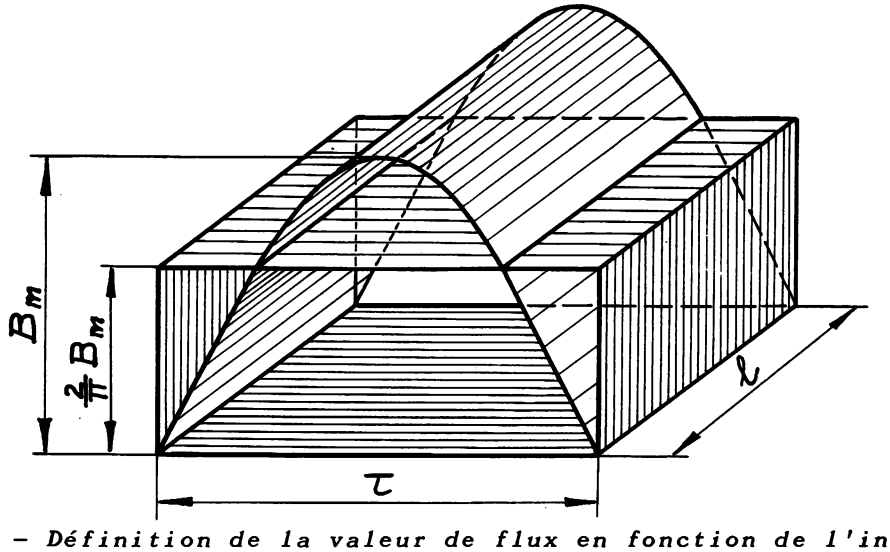


Fig.42 – Définition de la valeur de flux en fonction de l'induction maximum.

petite par rapport à la valeur maximum de sorte que le flux devient (fig.42) :

$$\Phi = \frac{2}{\Pi} \times B_m \times S_e = \frac{2}{\Pi} \times B_m \times \tau \times L_f \quad (14)$$

$$ou\ B_m \times \tau \times L_f = \frac{\Pi}{2} \Phi \quad (15)$$

D'autre part, si dans un champ magnétique en mouvement on a placé un conducteur perpendiculairement au plan formé par la direction de ce champ et par la direction du déplacement de ce champ, on constaterait une f.e.m. induite dans ce conducteur. Sa valeur instantanée e est d'autant plus grande que la valeur de l'induction B est grande à cet endroit et d'autant plus grande que la vitesse v de ce champ est plus grande par rapport à ce conducteur et enfin, d'autant plus grande que la longueur Lf de ce conducteur est plus grande.

$$e = B \times v \times L_f$$

La valeur maximum de cette f.e.m. est exprimée en volts par la formule:

$$E_m = B_m \times v \times L_f \times 10^{-8} \quad (16)$$

ou B maximum est exprimée en gauss, v en centimètres par seconde et L_f en centimètres. Le coefficient 10^{-8} ramène l'expression en unités pratiques c.à.d. en volts.

Comme il s'agit du conducteur se trouvant dans le champ se déplaçant le long de l'alésage du stator, la vitesse de ce champ tournant sera en centimètres par seconde :

$$v = \frac{\Pi \times Da \times No}{60}$$

Introduisant la formule (1) et (4) dans l'expression de la vitesse on a :

$$v = \frac{\Pi \times Da \times f}{p} = 2 \times \tau \times f \quad (17)$$

En l'introduisant dans l'expression de la f.e.m. maximum, on a :

$$E_m = 2\ B_m \times \tau \times L_f \times f \times 10^{-8} \quad (18)$$

Et suite à l'égalité (15) on a :

$$E_m = \Pi \times \Phi \times f \times 10^{-8}$$

Les appareils de mesure de valeurs alternatives en général et de valeurs sinusoïdales en particulier, n'enregistrent pas des valeurs maxima mais bien des valeurs efficaces, qui pour la loi sinusoïdale sont $\sqrt{2}$ fois plus petites que les valeurs maxima. De sorte que :

$$E_{eff} = \frac{Em}{\sqrt{2}} = \frac{\Pi}{\sqrt{2}} \times \Phi \times f \times 10^{-8} \qquad (19)$$

On constate que la f.e.m. efficace dans un conducteur se déplaçant dans un champ sinusoïdal tournant est proportionnelle au flux et à la fréquence de ce champ.

En outre, elle est indépendante du nombre de paires de pôles de ce champ.

Le champ tournant induit cette f.e.m. dans chaque conducteur de l'enroulement statorique créant ce champ tournant.

Pour l'enroulement avec n_1 spires par phase, la formule (19) devient pour $2\ n_1$ conducteurs :

$$E_{eff} = \frac{2\ n_1\ \Pi}{\sqrt{2}} \times \Phi \times f \times 10^{-8}$$

Cela est vrai seulement pour le cas, où toutes les n_1 spires constituant chaque phase d'enroulement statorique sont disposées dans deux encoches décalées l'une par rapport à l'autre d'un pas polaire τ. Dans ce cas la f.e.m. dans tous les conducteurs d'une même phase serait maximum, nulle et changerait le sens en même temps.

Mais en réalité, les spires d'une phase sont placées dans les encoches décalées l'une par rapport à l'autre. Leurs f.e.m. sont donc aussi décalées ou déphasées l'une par rapport à l'autre.

La f.e.m. atteint son maximum d'abord dans les conducteurs des encoches qui se présentent les premiers au champ tournant, puis successivement dans toutes les autres encoches (fig.43); il s'en suit que la valeur efficace de la f.e.m. E dans $2\ n_1$ conducteurs n'est pas $2\ n_1$ fois plus grande que dans un conducteur, mais

$2\,n_1 f_1$ fois; f_1 étant le coefficient du bobinage. Ce coefficient est toujours plus petit que l'unité et dépend du genre de bobinage.

Ainsi la valeur efficace de la f.e.m. de chaque phase d'enroulement devient :

$$E_{eff} = \frac{2\Pi}{\sqrt{2}} \times f_1 \times n_1 \times \Phi \times f \times 10^{-8} = 4{,}44 \times f_1 \times n_1 \times \Phi \times f \times 10^{-8}$$

Pour la fréquence de 50 *Hz*, sa valeur devient :

$$E_{eff} = 2{,}22 \times f_1 \times n_1 \times \Phi \times 10^{-6} \qquad (20)$$

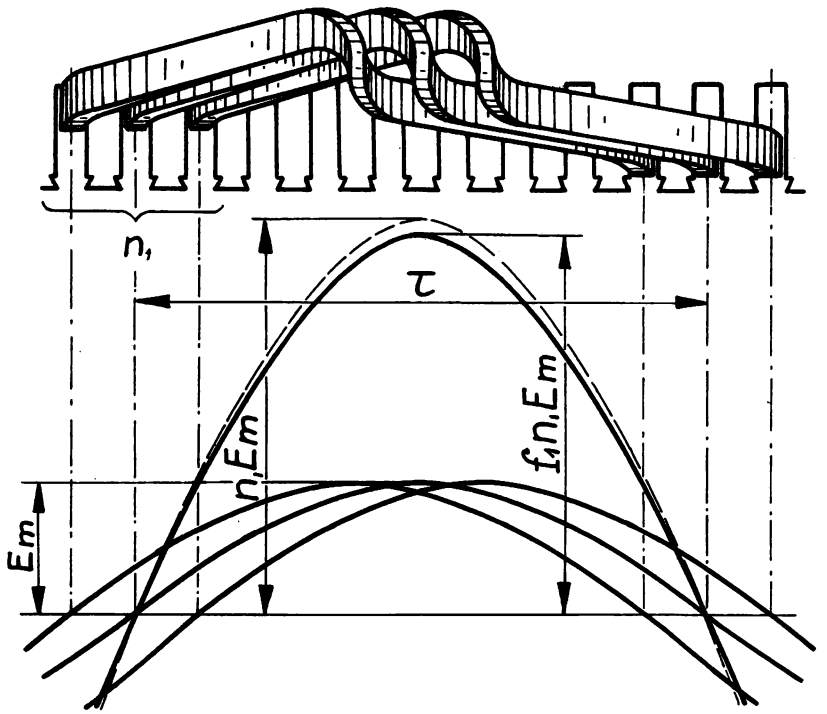


Fig.43 – Définition de la notion du coefficient de bobinage.

Les tableaux 8 et 9 donnent les valeurs de coefficients pour tous les pas et tous les nombres usuels des encoches par pôle et par phase. On constatera en examinant ce tableau qu'avec le raccourcissement du pas, les valeurs de coefficient de bobinage diminuent légèrement au commencement, puis de plus en plus rapidement,

q	PAS D'ENROULEMENT EXPRIMES EN NOMBRE DE DENTS																
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 1/5	0,732	**0,924**	0,942	0,783													
1 1/4	0,711	**0,910**	0,951	0,829													
1 2/5		0,861	**0,953**	0,913	0,747												
1 1/2		0,831	**0,945**	0,945	0,831												
1 3/5		0,795	**0,923**	0,954	0,883	0,718											
1 3/4		0,747	0,890	**0,953**	0,932	0,828											
1 4/5		0,732	0,877	**0,949**	0,941	0,854	0,695										
2		0,683	0,837	**0,933**	0,966	0,933	0,837	0,683									
2 1/5			0,778	0,887	**0,946**	0,951	0,903	0,804									
2 1/4			0,766	0,877	**0,941**	0,954	0,915	0,827	0,695								
2 2/5			0,732	0,847	**0,923**	0,954	0,941	0,883	0,782								
2 1/2			0,711	0,829	**0,910**	0,951	0,951	0,910	0,829	0,711							
2 3/5			0,689	0,807	0,893	**0,943**	0,954	0,927	0,863	0,764							
2 3/4				0,778	0,869	**0,928**	0,954	0,946	0,903	0,827	0,722						
2 4/5				0,769	0,861	**0,923**	0,953	0,949	0,913	0,844	0,747						
3				0,735	0,831	**0,902**	0,945	0,960	0,945	0,902	0,831	0,735					
3 1/5				0,697	0,794	0,870	**0,923**	0,951	0,953	0,930	0,882	0,811	0,718				
3 1/4				0,689	0,786	0,863	**0,917**	0,948	0,954	0,936	0,893	0,827	0,740				
3 2/5					0,762	0,841	**0,901**	0,939	0,955	0,948	0,919	0,868	0,796	0,706			
3 1/2					0,747	0,828	0,890	**0,932**	0,953	0,953	0,932	0,890	0,828	0,747			
3 3/5					0,732	0,813	0,877	**0,923**	0,945	0,955	0,941	0,907	0,853	0,782	0,695		
3 3/4					0,710	0,792	0,859	**0,908**	0,941	0,955	0,950	0,927	0,886	0,827	0,753		
3 4/5					0,703	0,785	0,852	**0,903**	0,937	0,954	0,952	0,932	0,894	0,840	0,770	0,685	
4					0,677	0,760	0,829	0,885	**0,925**	0,949	0,958	0,949	0,925	0,885	0,829	0,760	0,677
4 1/4						0,725	0,796	0,855	**0,901**	0,933	0,951	0,955	0,944	0,919	0,880	0,827	0,762
4 1/2						0,695	0,766	0,827	0,877	**0,915**	0,941	0,954	0,954	0,941	0,915	0,877	0,827
4 3/4							0,737	0,800	0,852	0,894	**0,926**	0,946	0,955	0,952	0,937	0,912	0,875
5							0,711	0,774	0,829	0,874	**0,910**	0,936	0,951	0,957	0,951	0,936	0,910
6								0,676	0,732	0,783	0,828	0,867	0,898	**0,924**	0,942	0,953	0,956
7										0,698	0,745	0,788	0,825	0,860	0,889	0,913	0,931
8											0,675	0,717	0,756	0,794	0,826	0,855	0,882
9												0,655	0,694	0,731	0,766	0,798	0,827
10													0,639	0,675	0,709	0,742	0,772

LES CHIFFRES SURCHARGES INDIQUENT LES COEFFICIENTS LES PLUS USUELS.

TABLEAU 8- COEFFICIENTS DE BOBINAGE POUR ENROULEMENTS IMBRIQUES A DEUX SECTIONS PAR ENCOCHE

d'où on peut tirer la conclusion que l'utilisation d'un pas trop raccourci n'est pas à conseiller, parce que, toute chose égale d'ailleurs, ce fait baisse la valeur de la f.e.m. induite dans un enroulement.

TABLEAU 9

q	Sections concentriques	Pas d'enroulement exprimés en nombre de dents: y							
		3	5	7	9	11	13	15	17
1 ½	*0,960*	*0,831*	**0,945**						
2	*0,966*	*0,707*	**0,966**	*0,966*	*0,707*				
2 ½	*0,957*		*0,829*	**0,951**	*0,910*	*0,711*			
3	*0,960*		*0,735*	*0,902*	**0,960**	*0,902*	*0,735*		
3 ½	*0,956*			*0,828*	*0,932*	**0,953**	*0,890*	*0,747*	
4	*0,958*			*0,766*	*0,892*	**0,958**	*0,958*	*0,892*	*0,766*
4 ½	*0,955*			*0,695*	*0,827*	*0,915*	**0,954**	*0,941*	*0,877*
5	*0,957*				*0,774*	*0,874*	*0,936*	**0,957**	*0,936*
6	*0,956*				*0,679*	*0,786*	*0,870*	*0,927*	**0,956**

Les chiffres surchargés indiquent les coefficients les plus usuels.

Coefficients de bobinage pour enroulements concentriques et imbriqués à une section par encoche.

Chapitre 9

CALCUL DU NOMBRE DE SPIRES

La tension d'alimentation U aux bornes d'un moteur doit équilibrer la chute de tension ohmique et inductive ainsi que la f.e.m. interne E induite dans l'enroulement par le champ tournant crée par cet enroulement même. Normalement, un faible pourcentage de la tension d'alimentation suffit pour compenser la chute de tension dans l'enroulement. Pour les moteurs de petite et de moyenne puissance, on peut dire avec une approximation suffisante, que la force électromotrice interne E induite dans un enroulement en charge normale est 97 % de la tension d'alimentation U.

Donc l'égalité (20) devient :

$$E_{eff} \approx 0,97\ U \approx 4,44 \times f_1 \times n_1 \times \Phi \times f \times 10^{-8} \qquad (21)$$

Il est à noter que la valeur de la force électromotrice E de l'égalité (20) se rapporte à une phase.

En cas de couplage des phases en triangle, la tension en ligne E_l est égale à la tension par phase E_p et on peut l'introduire dans la formule (21) telle qu'elle. Mais lorsque les phases d'un enroulement sont couplées en étoile $E_l = E_p \sqrt{3}$ (fig.44) la valeur à introduire dans l'égalité (21) doit être $\sqrt{3}$ fois plus petite que la tension de la ligne d'alimentation.

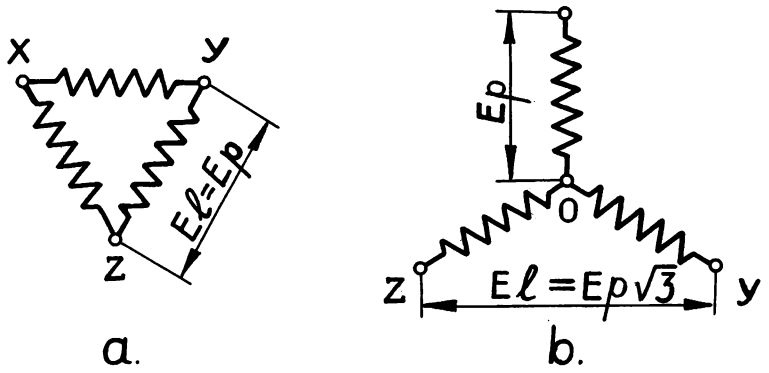


Fig.44– a – couplage de phases en triangle
b – couplage de phases en étoile

Les moteurs modernes de petite et de moyenne puissances sont généralement prévus pour deux tensions : 220 volts pour les phases couplées en triangle et pour 380 volts pour les phases couplées en étoile.

D'après la formule (20) on voit que pour une tension donnée et pour un coefficient de bobinage donné, on peut fixer le nombre de spires n pour autant que le flux Φ est connu. On pourrait conclure que le nombre de spires peut être quelconque, pourvu qu'on obtienne le flux correspondant.

Cependant, le flux d'une machine donnée ne peut pas être indéfiniment grand, sinon son circuit magnétique serait sursaturé. D'autre part, ce flux ne peut pas être indéfiniment petit, sinon la machine en question serait mal utilisée au point de vue économique.

Il est évident qu'il doit exister quelques limites serrées, confirmées par la pratique qui définissent les valeurs acceptables d'un flux. Parmi ces valeurs il est possible d'élaborer plusieurs variantes, dont une présentera toujours les meilleures possibilités d'exécution. Le choix ne doit pas être fait à l'aveugle, on doit se baser sur l'expérience acquise par la pratique de la construction des moteurs asynchrones.

On ne doit pas perdre de vue la circonstance qu'un nombre n_1 quelconque de spires en série par phase ne peut pas être accepté pour l'exécution d'un enroulement; mais seulement celui permettant d'obtenir des sections avec le même nombre de spires. Dans le cas contraire, l'exécution de sections serait très compliquée et par conséquent coûteuse .

Dans un enroulement dont les branches sont couplées en série, le nombre de conducteurs en série par phase est $2\,n_1$ et le nombre total de conducteurs pour trois phases est $6\,n_1$.

Si on divise ce nombre par le nombre d'encoches N_1, on obtient le nombre de conducteurs dans chaque encoche :

$$c_e = \frac{6\,n_1}{N_1}$$

Dans le cas d'un enroulement à x circuits parallèles dont chacun a n_1 spires, le nombre total doit être augmenté x fois, et le nombre de conducteurs par encoche devient :

$$c_e = \frac{6 \times x \times n_1}{N_1} \qquad (22)$$

La valeur de c_e est acceptable, pour autant qu'elle est définie par un nombre entier. Dans le cas d'un enroulement à deux sections par encoche c_e doit être un nombre entier et pair.

Finalement, pour établir les bases pour le choix du nombre de spires, examinons les conditions qui permettent l'établissement du flux dans les diverses parties du circuit magnétique.

Dans un moteur asynchrone, on peut distinguer cinq de ces parties (fig.45) :

1) Couronne statorique
2) Dents statoriques
3) Entrefer
4) Dents rotoriques
5) Couronne rotorique

En ce qui concerne l'entrefer, on a l'équation (15) qui établit la relation entre le flux magnétique et l'induction maximum dans l'entrefer.

L'induction dans l'entrefer est donc exprimée par :

$$B_m = \frac{\pi}{2} \times \frac{\Phi}{S_e} \approx 1,57 \times \frac{\Phi}{S_e} \qquad (23)$$

L'induction maximum dans l'entrefer des moteurs de petite et de moyenne puissances et calculée rationnellement, varie généralement de 5.000 à 9.000 gauss.

Cette induction est d'autant plus élevée qu'une machine est plus grande et que sa ventilation est plus intense.

Il va de soi qu'on est obligé de prendre les plus basses valeurs de cette induction pour les moteurs entièrement fermés.

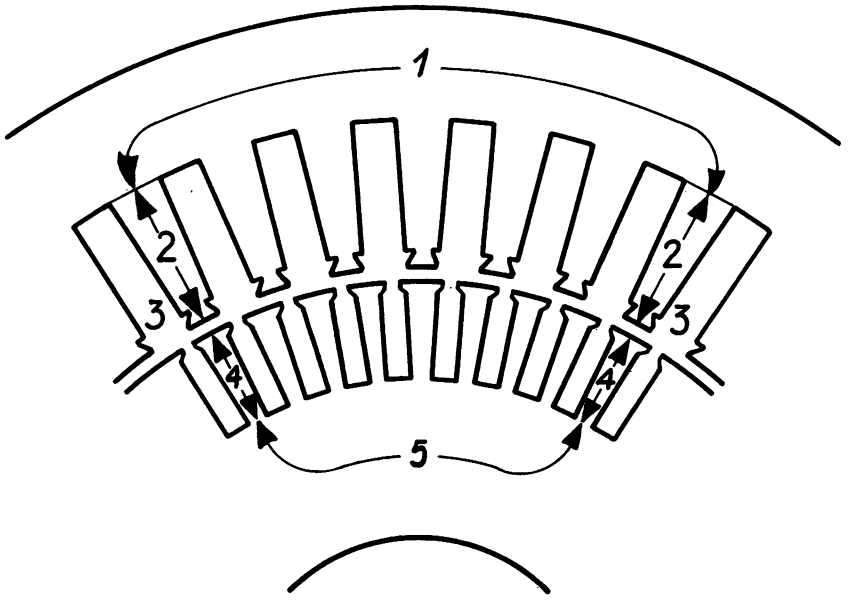


Fig. 45 – Les cinq tronçons du circuit magnétique d'un moteur asynchrone.

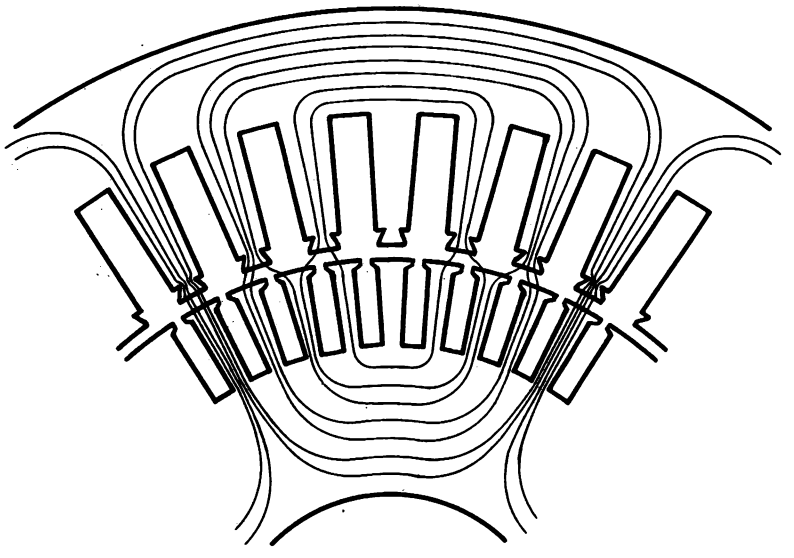


Fig. 46 – La distribution du flux magnétique dans un moteur asynchrone.

D'un côté de l'entrefer se trouve la couche des dents statoriques dont la section de passage au flux est S_s et de l'autre côté se trouve la couche des dents rotoriques dont la section de passage au flux est S_r.

Si l'induction dans l'entrefer était répartie uniformément sur toute sa surface S_e, l'induction dans les dents statoriques et rotoriques serait aussi uniforme et on pourrait obtenir sa valeur en divisant le flux par la section correspondante.

Cependant, en réalité l'induction dans l'entrefer est répartie suivant une loi presque sinusoïdale. Donc sa répartition dans les dents n'est pas uniforme et la plus grande induction se trouve dans les dents se trouvant en un moment donné en face des endroits ayant l'induction maximum dans l'entrefer.

Donc, on ne commet pas une grande erreur en considérant la même relation entre le flux et l'induction maximum dans les dents qu'on a dans l'entrefer :

$$B_s = \frac{\pi}{2} \times \frac{\Phi}{S_s} \simeq 1{,}57 \times \frac{\Phi}{S_s} \qquad (24)$$

L'expérience montre que l'induction optimum dans les dents du stator doit être comprise entre les limites 14.000 et 16.000 gauss.

Seulement, dans les moteurs multipolaires, cette induction peut atteindre 17.000 et même 18.000 gauss. En ce qui concerne l'induction dans les dents rotoriques d'un moteur à bagues, elle est généralement plus petite; de toute façon son influence dans un calcul n'est pas primordiale.

Sortant de la couche de dents, le flux se partage dans la couronne en deux parties (fig. 46).

Avec une approximation suffisante on peut considérer que l'induction maximum est uniformément répartie sur toute la section de la couronne statorique. D'où l'on conclut qu'entre le flux et l'induction maximum dans la couronne statorique il y a la relation :

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2\ S_{cs}} \qquad (25)$$

Les inductions maxima dans la couronne statorique doivent se situer entre 12.000 et 14.000 gauss. Ces valeurs limites sont souvent beaucoup plus basses pour les moteurs multipolaires.

Dans les moteurs à deux pôles on est parfois obligé d'admettre les valeurs d'induction de 16.000, 17.000 gauss et même plus, mais dans les cas très rares et à titre exceptionnel.

On a une relation analogue pour l'induction maximum de la couronne rotorique :

$$B_{cr} = \frac{\Phi}{2\ S_{cr}} \qquad (26)$$

Généralement la valeur B_{cr} est plus petite que celle de B_{cs} et comme l'induction dans les dents rotoriques, elle n'a pas d'importance décisive dans un calcul.

Ayant défini ces relations, on peut choisir, moyennant un tâtonnement, plusieurs nombres de spires et leur flux correspondant, puis calculer les inductions qui en résultent dans des diverses parties du circuit magnétique. Un tableau comparatif des inductions permet de choisir une variante dont les inductions sembleront être dans les limites favorables.

Exemple :

On demande de déterminer le nombre de spires en série par phase pour l'enroulement statorique d'un moteur à 4 pôles de 8,1 kW pour 220/380 volts.

Le stator comporte 36 encoches et un enroulement imbriqué à une section par encoche avec le pas entier.

Les dimensions du circuit statorique sont les suivantes :

Section de l'entrefer:	S_e - 139 cm^2
Section de la denture statorique:	S_s - 66,5 cm^2
Section de la couronne:	S_{cs} - 24,2 cm^2

Prenons au hasard 7770 gauss pour l'induction dans l'entrefer, ce qui est normal pour un moteur de cette puissance.

Dans ce cas :

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \times B_m \times S_e = \frac{2}{\pi} \times 7770 \times 139 = 690.000 \text{ maxwells.}$$

Le nombre de spires en série par phase peut être calculé suivant la relation (21) :

$$n_1 = \frac{0,97\ U}{4,44 \times f_1 \times \Phi \times f} = \frac{0,97 \times 220 \times 10^8}{4,44 \times 0,96 \times 690.000 \times 50} = 145$$

Suivant la condition (22) le nombre de spires doit être entier et multiple de $\frac{N_1}{6} = \frac{36}{6} = 6$

Le nombre qui remplit cette condition et qui s'approche le plus de 145 est 144 - 24 × 6.

Pour contrôler les inductions dans les autres parties du circuit magnétique, calculons d'avance les variantes avec le nombre de spires supérieur et inférieur, donc avec :

132 - 22 × 6
138 - 23 × 6
150 - 25 × 6

Les résultats de calcul peuvent être rassemblés dans le tableau 10.

Les deux variantes, avec 144 et 150 spires en série par phase, semblent convenir. Pour choisir entre les deux, il y a lieu d'envisager d'autres considérations. Si l'enroulement était à deux sections par encoche, la variante avec n_1 - 150 serait éliminée, étant donné qu'elle a un nombre impair (25) de spires par encoche.

La variante avec 144 spires est meilleure au point de vue de l'échauffement. Voir à cet effet, plus loin, les considérations sur l'échauffement des moteurs.

A titre comparatif, calculons le même moteur pour un enroulement à six pôles. Dans ce cas, les sections de l'entrefer et de la denture seront seulement deux tiers de sections d'enroulement à 4 pôles.

$$S_e = 139 \times \frac{2}{3} - 92,5 \text{ cm}^2$$

$$S_s = 66,5 \times \frac{2}{3} - 44,4 \text{ cm}^2$$

TABLEAU N° 10

Nombre de spires en série par phase		n	132	138	144	150
FLUX		$\Phi = 10^6$ x	0,758	0,725	0,695	0,667
Inductions	dans l'entrefer	$B_m = \frac{\Pi}{2} \times \frac{\Phi}{139} =$	8560	8200	7860	7535
	dans la denture	$B_s = \frac{\Pi}{2} \times \frac{\Phi}{66,5} =$	7900	17150	16400	15800
	dans la couronne	$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \times 24,2} =$	15650	15000	14350	13800

Le flux pour l'induction dans l'entrefer de 7770 gauss devient :

$$\Phi = \frac{2}{\Pi} \times 7770 \times 92,5 = 457.500 \text{ maxwells}$$

et le nombre de spires en série par phase devient :

$$n_1 = \frac{0,97 \times 220 \times 10^8}{4,44 \times 0,96 \times 457.500 \times 50} = 218$$

Le plus proche chiffre entier et multiple de 6 est 216 - 36 × 6.

Considérons également les variantes suivantes :

204 = 34 × 6
228 = 38 × 6
240 = 40 × 6

Les résultats de calcul sont rassemblés dans le tableau 11.

Ici on doit évidemment donner la préférence aux variantes avec les petits nombres de spires en série par phase.

TABLEAU N° II

Nombre de spires en série par phase		n	204	216	228	240
FLUX		$\Phi = 10^6 \times$	0,490	0,463	0,438	0,416
INDUCTIONS	dans l'entrefer	$B_m = \frac{\Pi}{2} \times \frac{\Phi}{92,5} =$	8300	7860	7420	7060
	dans la denture	$B_s = \frac{\Pi}{2} \times \frac{\Phi}{44,4} =$	17150	16180	15230	14700
	dans la couronne	$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \times 24,2} =$	10100	9570	9030	8600

La variante avec 204 spires a l'induction dans la denture à la limite admissible, mais son induction dans la couronne est si basse qu'on se demande si la variante avec 192 spires ne doit pas être envisagée.

La décision finale dépend du calcul ultérieur au point de vue des caractéristiques électriques, de l'échauffement, de la disponibilité en conducteurs.

Le problème prend un tout autre aspect lorsqu'on entreprend le calcul de la même machine pour un enroulement à deux pôles. Il va de soi que dans ce cas la section de l'entrefer et la section de la denture, deviennent doubles de celles de quatre pôles.

$$S_e = 139 \times 2 = 278 \text{ cm}^2$$

$$S_s = 66,5 \times 2 = 133 \text{ cm}^2$$

Il n'est pas question ici de conserver l'induction 7770 gauss sinon le flux serait trop grand. Prenons seulement 60 % c.à.d. 4.660 gauss. Dans ce cas le flux devient :

$$\Phi = \frac{2}{\Pi} \times 4.660 \times 278 = 825.000 \text{ maxwells.}$$

et le nombre de spires en série par phase devient :

$$n_1 = \frac{0,97 \times 220 \times 10^8}{4,44 \times 0,96 \times 825.000 \times 50} = 121$$

Le plus proche multiple de 6 est 120 = 20 × 6

Examinons aussi :

114 = 6 × 19
126 = 6 × 21
132 = 6 × 22

Rassemblons les flux et les inductions dans le tableau 12.

TABLEAU N° 12

Nombre de spires en série par phase		n	114	120	126	132
FLUX		$\Phi = 10^6$ x	0,878	0,832	0,793	0,757
INDUCTIONS	dans l'entrefer	$B_m = \frac{\Pi}{2} \times \frac{\Phi}{278}$ =	4960	4700	4480	4275
	dans la denture	$B_s = \frac{\Pi}{2} \times \frac{\Phi}{133}$ =	10400	9840	9400	8960
	dans la couronne	$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \times 24,2}$	18180	17200	16400	15650

La basse induction dans la couronne, dans le cas de 6 pôles, pouvait encore être acceptée, parce que l'induction de la denture et de l'entrefer avaient des valeurs normales.

Ici par contre, même avec les inductions réduites dans l'entrefer et dans la denture, on a dans la couronne une induction en dehors de la tolérance admissible. Aucune des quatre variantes ne

doit être considérée et il y a lieu de refuser de rebobiner ce moteur pour les deux pôles.

Dans un cas extrême, on pourrait éventuellement s'arrêter à la variante 132, ou tout au moins à 126 spires.

Chapitre 10

CALCUL DE LA DIMENSION DES CONDUCTEURS CIRCULAIRES

Dès que le nombre de spires par section est déterminé, on peut passer au problème de dimensionnement du conducteur; notamment à la détermination du diamètre, lorsqu'il s'agit de fil rond.

La méthode à appliquer pour la détermination des dimensions dépend en grande partie de la forme de l'encoche ainsi que du genre de l'enroulement choisi.

Les formes usuelles des encoches statoriques peuvent être partagées en deux groupes : un groupe contenant les encoches trapézoïdales et un autre contenant les encoches droites.

Lorsqu'on a affaire avec les encoches de forme trapézoïdale, il va de soi qu'on ne peut pas y introduire l'enroulement à barres, ni par la fente, ni par "enfilade" mais seulement un enroulement à fil rond introduit par "semaille" à travers la fente de l'encoche. Dans ce cas, le diamètre extérieur du fil isolé doit être tout au plus égal à la largeur de fente d'encoche diminuée d'un millimètre. On conçoit facilement qu'aucun ordre dans la disposition de fils ne peut être respecté. Les fils se logent "en vrac" en se croisant et en laissant des cavités. Pour définir la section utile d'encoches, disponible pour les fils ronds, on se base sur les données d'expérience, exprimées en coefficients de remplissage et fixant en chiffres la section d'encoche qui peut être utilisée par les conducteurs.

Lorsque les conducteurs se logent suivant la fig. 47a, le coefficient de remplissage est :

$$\frac{\text{section utile}}{\text{section totale}} = \frac{\Pi\ R^2}{(2R)^2} = 0{,}785$$

et lorsque les conducteurs se logent suivant la fig. 47b, le coefficient de remplissage est :

$$\frac{\text{section utile}}{\text{section totale}} = \frac{\Pi \times R^2}{2} \times \frac{2}{2\ R^2 \times \sqrt{3}} = 0{,}906$$

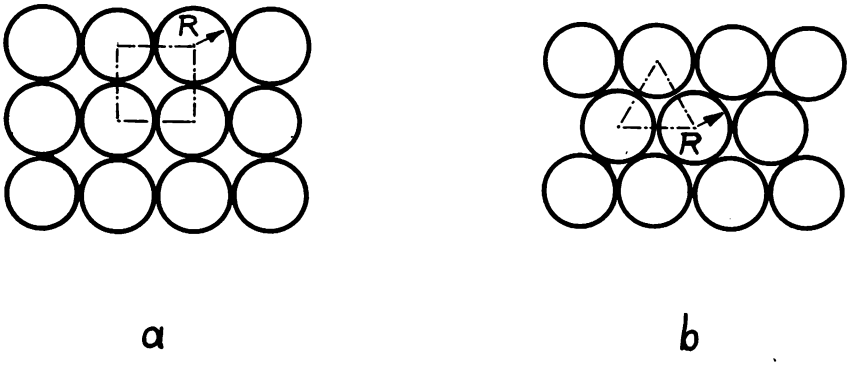


Fig.47 - Remplissage d'une encoche à conducteurs circulaires.

Etant donné que les parois de l'encoche doivent être isolées de la masse, on perd davantage encore en section utile et les coefficients de remplissage tombent encore plus bas. Ils dépendent de la qualité de l'isolement de la masse, ainsi que de l'isolement du conducteur : émail et guipage.

Comme l'isolement disponible varie en qualité et en dimensions d'un fournisseur à l'autre, les coefficients de remplissage varient et doivent être déterminés par l'expérience.

Puisque les encoches trapézoïdales ne sont jamais très grandes, elles doivent avoir un isolement de la masse très mince, donc d'une qualité supérieure.

On peut prendre comme base, le tableau 13 pour fixer l'épaisseur d'isolement d'encoche de la masse.

On trouve actuellement sur le marché un carton lustré bien pressé, connu sous le nom de cartogène ou leatheroïde. Il est considéré normal que l'isolement de l'encoche occupe 15 à 18 % de la section totale de l'encoche d'un enroulement à une section par encoche.

La cale intermédiaire d'un enroulement à deux sections par encoche prend encore 5 % de la section totale. La cale de fermeture nécessite aussi une certaine section; dans les petites encoches elle peut occuper de 8 à 10 % de la section totale.

TABLEAU N° 13

Puissance ek kw	Epaisseur d'isolant de la masse. (repère 1 de la fig.7)	Cale de fermeture (repère 3 de la fig.7)	Cale intermédiaire (repère 2 de la fig.7)
0,5 à 2	0,5 mm	0,6 mm	0,5 mm
2 à 11	0,6 mm	0,8 mm	
11 à 35	0,7 mm		
35 à 70	0,8 mm		

Lorsqu'on déduit de la section totale, l'isolement d'encoche, la cale intermédiaire et la cale de fermeture, on obtient la section utile.

Le rapport de la section totale des conducteurs isolés à la section utile est appelé le coefficient de remplissage. Si S_u est la section utile et S_f est la section d'un fil avec son isolement, le coefficient de remplissade est exprimé par le rapport :

$$r_m = \frac{S_f \times \text{nombre total de fils dans une encoche}}{S_u} = \frac{S_f \times c_e}{S_u}$$

A titre indicatif on peut fixer pour un enroulement à 2 sections par encoche, le coefficient optima à 55 %. On peut admettre 60 % pour le gros fil et 63 % pour le fil très fin. Le coefficient de 64 % peut être admis, mais exceptionnellement.

De ce qui précède il résulte que, connaissant la section utile d'une encoche et en se donnant un coefficient de remplissage approprié, on peut calculer le diamètre extérieur (isolement compris d'un conducteur).

Et en effet si $S_f = \frac{\Pi \times d_i^2}{4}$

d_i étant le diamètre extérieur d'un fil isolé, le coefficient de remplissage devient :

$$r_m = \frac{\Pi \times d_i^2 \times c_e}{4 \times S_u} \qquad d'où \quad d_i = \sqrt{\frac{S_u \times 4 \times r_m}{c_e \times \Pi}}$$

où c_e est le nombre total de conducteurs dans une encoche.

La tendance d'augmenter le coefficient de remplissage oblige à employer un enroulement à une section par encoche. On gagne aussi en utilisant un guipage de fil très fin.

L'emploi d'un fil isolé à l'émail organique a pris une très grande extension dans les moteurs de petites puissances.

Le guipage à l'émail est très mince, peu hygroscopique et très bon conducteur de chaleur. Son défaut principal réside dans le manque de solidité mécanique : il s'écaille facilement au moindre grattage. Pour cette raison on n'emploie le fil émaillé que lorsque son guipage en émail possède de très bonnes qualités mécaniques.

Sinon, il est nécessaire d'employer le fil avec guipage supplémentaire en fil de coton, en soie ou en soie de verre.

Après la deuxième guerre mondiale, on a mis au point en Amérique et en Europe la fabrication du fil en émail synthétique couvrant le fil d'une très mince couche de résine synthétique à base de polyvinyl-acetal. Ses qualités mécaniques sont extraordinaires, de sorte que même pour dénuder les bouts de fil afin de connecter les deux sections, il faut employer les procédés spéciaux. Son emploi a presque supplanté l'utilisation de fil à l'émail organique.

On utilise dans les moteurs asynchrones de petite puissance les fils émaillés de 0,45 mm à 1,65 mm de diamètre.

Ce diamètre maximum est fixé par la dimension d'entaille par laquelle on introduit le fil dans l'encoche ainsi que par la difficulté de "semer" dans l'encoche du fil de diamètre supérieur à 1,65 mm.

Dans le cas de section plus grande, il y a lieu de prendre 2, 3 et même 4 fils en parallèle.

Les fabricants de fils fournissent généralement des tableaux donnant les dimensions des fils, les sections, les épaisseurs des

isolants et les tolérances.

Exemple :

Lorsque l'encoche semi-fermée d'un moteur de 14,7 kW a une section utile de 268 mm^2 et lorsque le moteur doit comporter le bobinage à deux sections par encoche avec 12 conducteurs par section, on a le diamètre isolé du fil par la formule.

Choisissons le coefficient de remplissage de 60 %.

$$d_i = \sqrt{\frac{S_u \times 4 \times r_m}{C_e \times \Pi}} = \sqrt{\frac{268 \times 4 \times 0,6}{24 \times \Pi}} = 2,92$$

Ce diamètre dépasse le diamètre nominal admissible de 1,65 mm, donc il faut subdiviser le conducteur en deux ou trois fils en parallèle. Essayons les deux fils par conducteur. Dans ce cas, "n" devient égal à 24 × 2 = 48 et

$$d_i = \sqrt{\frac{268 \times 4 \times 0,6}{48 \times \Pi}} = 2,07$$

Ce diamètre est encore trop grand.
Prenons les trois fils par conducteur en parallèle.
Le diamètre isolé devient :

$$d_i = \sqrt{\frac{268 \times 4 \times 0,6}{72 \times \Pi}} = 1,685$$

On constate que le fil émaillé de 1,4 mm et isolé à une couche de coton a le diamètre sur l'isolant de 1,655 mm. Recalculons maintenant le coefficient de remplissage.

$$r_m = \frac{\Pi \times d_i^2 \times C_e}{4 \times S_u} = \frac{\Pi \times 1,655^2 \times 72}{4 \times 268} = 57,8\ \%$$

Chapitre 11

CALCUL DES DIMENSIONS DES CONDUCTEURS RECTANGULAIRES

Dans les moteurs modernes plus ou moins grands, ayant des encoches droites, il est rationnel d'utiliser les sections avec des conducteurs rectangulaires. On les fabrique d'avance, complètement isolées et on les introduit dans les encoches presque achevées.

Dans les cas particuliers, les sections pourront être fabriquées avec les conducteurs ronds. Dans les deux cas on utilise le guipage à deux couches de coton. Pour les échauffements plus grands (classe B) on utilise le guipage à l'amiante et à la soie de verre. Ce dernier guipage a la tendance de remplacer tous les autres isolants en classe B. Entre les couches de conducteurs on peut mettre suivant la nécessité des intercalaires minces en presspahn pour classe A et en micanite en classe B.

Finalement on isole l'ensemble d'une section. On recommande d'isoler les spires individuelles de très grosses machines à 3150 et 6300 volts avec un ruban micassé.

On distingue deux genres d'isolement de sections dans l'encoche : isolement à capote et isolement par enrubannage.

Isolement à capote.

Les parties des sections qui doivent se loger dans l'encoche sont enveloppées par plusieurs couches continues d'une matière isolante. On utilise à cet effet des feuilles minces de presspahn, de toile huilée et de micafolium.

On choisit la largeur de ces feuilles, de telle façon qu'elle prenne toute la longueur à isoler, généralement dépassant la longueur de fer. Il est considéré qu'on a une couche et un quart d'isolant, lorsque la feuille couvre les trois côtés d'une section une fois et le quatrième côté (généralement petit côté) deux fois (fig.48).

Pour protéger l'isolement électrique d'une section lors de sa mise en place dans une encoche, on prévoit un "cavalier" constitué par une feuille mince de leatheroïd dur, possédant de très bonnes qualités mécaniques (fig.49).

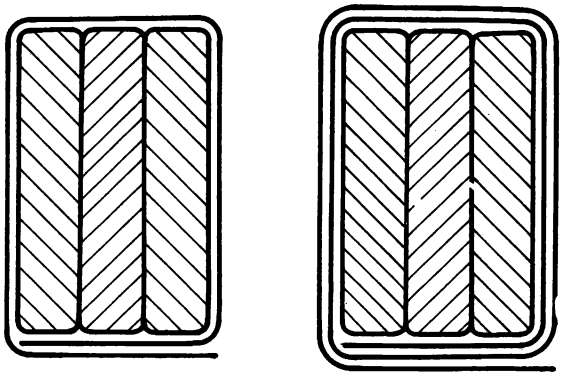


Fig.48 - Isolement des barres à capote.

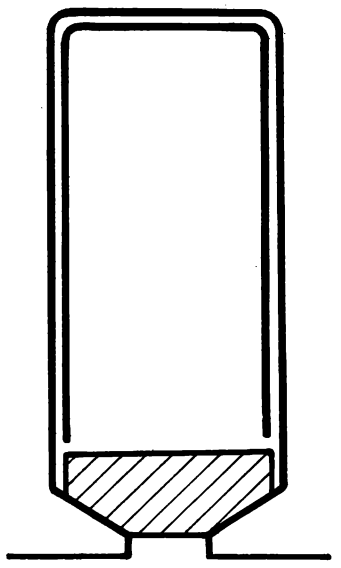


Fig.49 - Protection de l'isolement d'une section.

Les têtes de sections n'étant pas droites, ne peuvent pas être isolées avec des capotes. Elles doivent être enrubannées avec des rubans en toile huilée ou micassée.

Cette opération doit généralement précéder celle de l'isolement des parties droites.
Il existe deux méthodes fondamentales d'enrubannage.

La première est appelée "l'enrubannage jointif". Les bords de deux tours consécutifs se touchent, mais ne se recouvrent pas. L'épaisseur simple de cette couche est égale à l'épaisseur du ruban (fig.50).

La seconde méthode est appelée "l'enrubannage à demi-recouvrement". Elle est caractérisée par le recouvrement d'un tour de ruban du tour précédent, à moitié de sa largeur. L'épaisseur simple de cette couche est égale à l'épaisseur double du ruban (fig. 51).

Dans tous les cas, il est à conseiller de prévoir une dernière couche à jaconas à demi-recouvrement pour protéger mécaniquement les couches internes ayant des hautes qualités isolantes.

Après l'achèvement de l'enrubannage on fait subir à l'enroulement un traitement d'imprégnation au vernis, ce qui provoque un gonflement de l'isolant à rubans et l'épaisseur devient jusqu'à 113% de sa dimension primitive.

On peut conclure que dans la méthode à capote on isole les parties droites d'une façon différente de celle de têtes de section et ceci en composition, comme en arrangement.

Isolement par enrubannage.

Dans ce genre d'isolement on isole les parties droites d'une section, de même façon que les têtes de sections, de sorte qu'il n'y a pas d'interruption d'enrubannage en passant d'une partie à l'autre, seulement le nombre de couches de ruban est supérieur dans les parties droites.

Dans la plupart des cas, on utilise un ruban micassé, mais l'utilisation du ruban à toile huilée est possible pour toutes les tensions jusqu'à 6 300 volts y compris.

Pour protéger les sections isolées comme ci-dessus contre le dommage mécanique lors de la mise en place dans les encoches, il est à conseiller de prévoir encore une couche de ruban jaconas.

Comme lors de la pose du ruban micassé, on applique en abondance des épaisses couches de vernis, l'épaisseur finale d'isolement simple est supérieure à la somme des épaisseurs des couches du ruban micassé seul. Ce grossissement dépend de la qualité du vernis ainsi que du nombre de couches de ruban: il est moins pro-

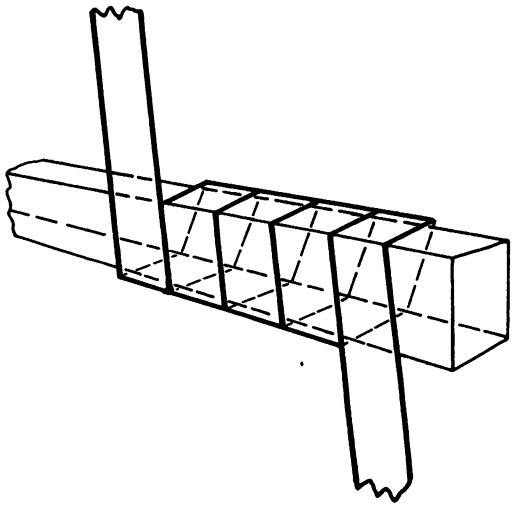


Fig.50 - Enrubannage jointif ou bout à bout.

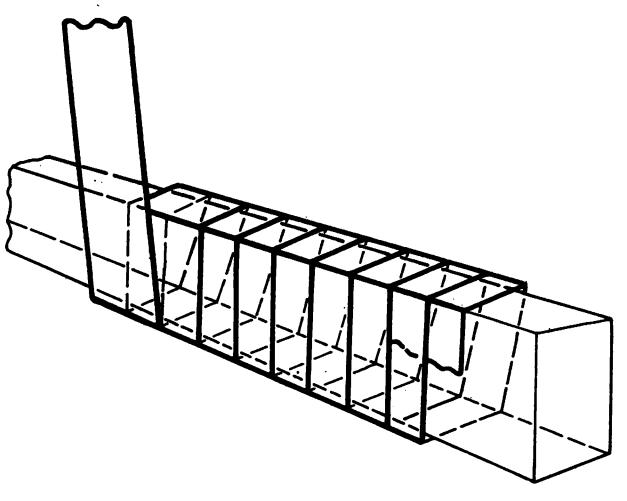


Fig.51 - Enrubannage à demi—recouvrement.

noncé lorsque la viscosité du vernis est moindre et que le nombre de couches est plus grand.

L'isolement par enrubannage est considérablement supérieur à celui à capote parce qu'il est continu et qu'il n'y a pas d'interruption entre la capote de la partie droite et le ruban des têtes d'une section. Par contre, il exige plus de temps, l'isolant est plus coûteux et il exige une main d'oeuvre expérimentée dont on ne dispose généralement pas dans un atelier d'entretien ou de réparation.

Les sections des moteurs de moyenne puissance et à basse tension, ne dépassant pas 500 volts, sont souvent isolées dans l'encoche ainsi qu'en dehors de fer seulement avec une ou deux couches de ruban.

Ces moteurs ont généralement des encoches rectangulaires munies de conducteurs à barres. On préconise à s'en tenir aux règles ci-dessous pour le choix des dimensions du conducteur et de l'isolant.

La largeur des barres ne doit pas dépasser 3 mm, la hauteur ne doit pas dépasser 12,5 mm. Lorsque la section est supérieure à 37,5 mm^2, on subdivise la section et on prend deux et même trois barres en parallèle.

Pour un nombre de barres supérieur à deux, on prévoit une couche de papier isolant "4" de 0,1 mm d'épaisseur entre barres (fig. 52), si l'enrubannage de jaconas à demi-recouvrement "5" prend généralement 0,6 mm pour l'épaisseur double d'une couche de ruban en soie de verre il ne prendra que 0,5 mm.

Pour les encoches avec un conducteur par section et lorsque le nombre de barres ne dépasse pas deux, le ruban peut être supprimé.

Pour les encoches avec un conducteur par section, avec un nombre de barres supérieur à deux, on mettra un ruban jointif pour tenir mécaniquement l'ensemble de barres. On prévoit un papier lustré "1" (fig.52) de 0,2 mm d'épaisseur entre deux conducteurs seulement lorsque la tension entre les conducteurs dépasse 15 volts.

On peut conseiller les épaisseurs suivantes de capote "6"

suivant la largeur de l'encoche :

0,8 mm pour la largeur jusqu'à 12 mm
1,0 mm pour la largeur entre 12 et 15 mm
1,2 mm pour la largeur plus grande que 15 mm.

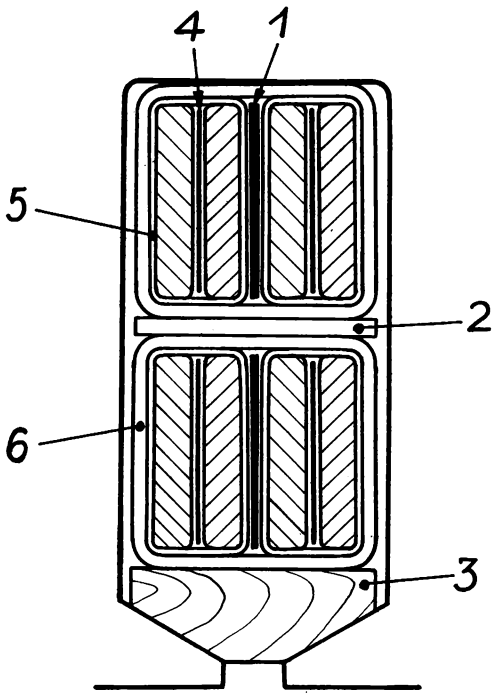


Fig.52 – Isolement des barres d'une encoche d'un moteur de moyenne puissance.

La cale "2" en carton peut être d'un millimètre d'épaisseur.

Les jeux en hauteur et en largeur peuvent être pris de 0,8 à 1 mm. La hauteur de la cale "3" peut être de 3 à 4 mm.

Les conducteurs méplats de section rectangulaire doivent être placés dans les encoches avec le côté plat parallèle à l'entrefer (fig.53) contrairement à ce qu'on a dans les enroulements rotoriques de moteurs asynchrones et dans les induits de machines à courant continu, et ceci afin de réduire les pertes supplémentaires dues aux courants Foucault.

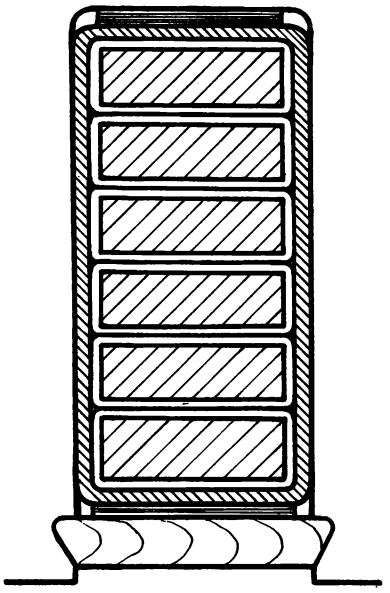


Fig.53 - Disposition des conducteurs méplats dans une encoche statorique.

Etant donné que ces pertes varient comme la quatrième puissance de la hauteur du conducteur dans une encoche, on se rend compte de l'importance de cette précaution.

Il est préférable d'éviter l'utilisation de conducteurs à section carrée ou s'approchant du carré, lors de roulement ils peuvent facilement se tordre et compromettre ainsi le profil de matrissage de section. On constate généralement un grand pourcentage de rebut de sections avec de tels conducteurs.

Lorsque le nombre de spires par section est assez grand et qu'on n'arrive pas à les loger dans une couche comme sur la fig. 53, on est amené à utiliser l'enroulement à deux conducteurs par couche aussi appelé "par petites couches".

Il est à conseiller d'éviter, dans la mesure du possible, ce genre de sections et voici pourquoi. L'ordre d'enroulement des conducteurs peut se faire suivant deux méthodes : en descendant

et puis en remontant la section suivant la fig.54a ou en descendant par couches suivant la fig.54b.

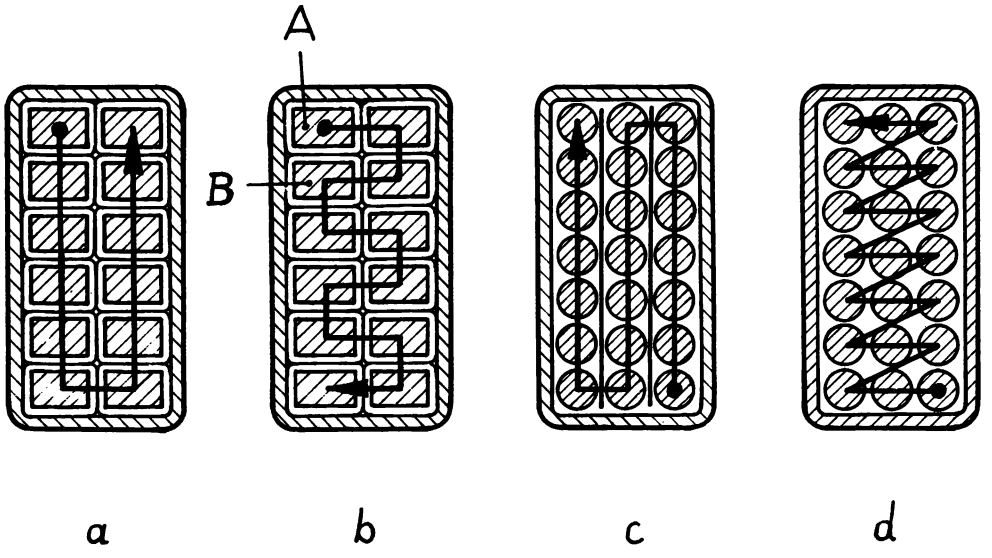


Fig.54 – Deux méthodes de succession des conducteurs méplats et ronds.

Les deux méthodes ont des inconvénients graves. La première méthode, bien qu'elle ne donne pas de croisement dans les têtes, n'est pas acceptable étant donné qu'entre la première et la dernière spire, on a la plus grande tension alors que l'isolement entre deux rangées reste le même. La tension entre les spires voisines d'une même couche de la seconde méthode est réduite et la même entre toutes les spires, mais les croisements dans les têtes de section nécessitent une main d'oeuvre expérimentée.

D'autre part, on doit particulièrement faire attention à l'encombrement des têtes de bobines. Suite aux croisements des conducteurs la périphérie d'une section devient nécessairement plus grande.

Lorsque la tension entre les deux conducteurs A et B de la fig. 54b est supérieure à 10 volts, on doit mettre un intercalaire en carton lustré de 0,2 mm entre chaque couche de conducteurs.

Cette tension est égale à 3 fois la tension par phase, divisée par le nombre de spires en série par phase.

On mettra cet intercalaire entre deux couches même lorsqu'il n'y aura qu'un conducteur par couche, mais lorsque ce conducteur est très large et le rapport entre sa largeur et sa hauteur est supérieur à 3.

A basse tension lorsqu'on ne dispose pas de conducteur guipé, on peut utiliser un conducteur rectangulaire non guipé, en isolant une spire sur deux à demi-recouvrement avec un ruban jaconas. Il faut veiller à ce que les conducteurs se trouvant en haut et en bas de l'encoche soient isolés. (fig.55).

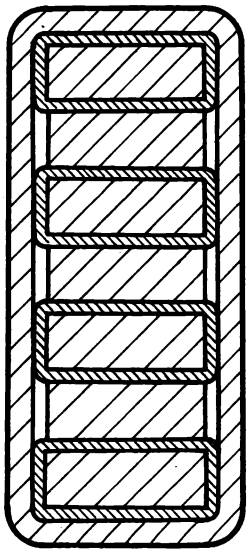


Fig. 55 – Isolement d'une spire sur deux.

On n'utilise cette méthode qu'en cas extrême vu que l'enrubannage des conducteurs exige une main d'oeuvre supplémentaire.

En cas de manque de conducteur de section appropriée, on peut utiliser un conducteur de section plus petite en parallèle, toutefois ces deux conducteurs doivent se trouver l'un à côté de l'autre c.à.d. dans la même couche et jamais l'un au dessus de l'autre.

Il est à remarquer qu'on perd en section utile de cuivre, parce que l'espace occupé par le guipage entre deux sections adjacentes est prise inutilement.

Dans les cas d'un conducteur à une très grande section, on est amené à subdiviser en deux et même en quatre conducteurs, afin de faciliter leur roulement et réaliser des sections relativement souples pour la mise en place aisée dans les encoches.

Etant donné que les conducteurs rectangulaires sont toujours disposés dans une encoche suivant un ordre bien fixé, on peut facilement déterminer leurs dimensions en partant des dimensions de cette encoche, en tenant compte des épaisseurs d'isolants et des jeux nécessaires pour la mise en place.

EXEMPLE DE CALCUL :

Supposons que l'encoche d'un moteur à 3000 volts ait les dimensions suivant la fig. 56 et qu'on doive y loger un enroulement à deux sections par encoche avec 2 × 16 conducteurs par encoche. On demande de déterminer les dimensions du conducteur isolé par deux couches de coton.

Calculons la largeur du conducteur.

Pour la tension en question il faut une capote de 1,6mm. Comme le nombre de conducteurs est assez grand, il faut mettre deux conducteurs par couche. Prenons le jeu d'un millimètre. La place disponible pour deux conducteurs est:

$$12 - 1 - (2 \times 1{,}6) = 7{,}8 \text{ mm}$$

Prenons 1,03 comme coefficient de remplissage, donc la largeur d'un conducteur isolé devient :

$$\frac{7{,}8}{2 \times 1{,}03} = 3{,}78$$

Retranchons 0,4 mm de guipage pour deux couches de coton : on a 3,38 mm. Or la dimension la plus proche qu'on trouve en commerce est de 3,4 mm, ce que nous prenons en acceptant le jeu de 0,98 mm au lieu de 1 mm.

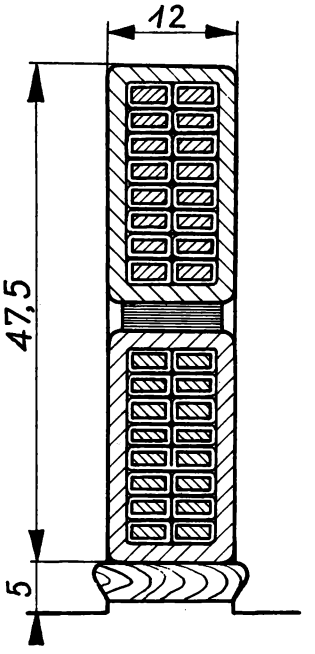


Fig. 56 – Encoche d'un moteur de moyenne puissance à haute tension.

En hauteur on a :

1)	quatre épaisseurs de capote	= 1,6 × 4 =	6,4
2)	14 entremises de 0,2 (étant donné que la tension entre 2 conducteurs de la même colonne est de 10 V)	= 0,2 × 14 =	2,8
3)	cale entre des sections (3 mm pour 3 000 V)	=	3,0
4)	jeu (provisoirement)	=	0,8
		Total	13,0

Il reste pour les conducteurs : 47,5 - 13 = 34,5 mm.

Comme on a 16 conducteurs en hauteur et comme le coefficient de remplissage est 1,03 on a pour la hauteur du conducteur isolé :

$$\frac{34,5}{1,03 \times 16} = 2,09 \text{ mm.}$$

Retranchons 0,4 mm de guipage pour deux couches de coton : on a 1,69 mm.
Or la dimension la plus proche qu'on trouve en commerce est de 1,7 mm. Donc en prenant le jeu de 0,7 mm, nous pouvons accepter le conducteur de 3,4 × 1,7.

Il est à noter que le rapport du $\frac{3,4}{1,7} = 2$ tombe entre les limites 1,2 et 3, admises par expérience.

D'autre part, la section 3,4 × 1,7 = 5,78 mm^2 est loin de la limite de 30 mm^2 après laquelle on conseille de subdiviser la section d'un conducteur. La largeur maximum acceptable est 7,4 mm. On ne conseille pas de prendre un conducteur de section inférieure à 5 mm^2 (pour 5 mm^2 le rapport de dimensions doit être minimum 1,7), sinon prendre le fil rond. Le jeu en largeur peut varier entre 0,8 et 1,0 mm (on ne prend pas plus que 1 mm); les jeux en hauteur peuvent être de 0,7 à 0,95.

Ces valeurs correspondent aux dimensions de l'encoche découpée. Pour l'encoche montée, elles peuvent être diminuées de 0,2 sur la largeur et de 0,1 mm en hauteur.

Dans les encoches rectangulaires des grands moteurs, dont l'enroulement est concentrique à une section par encoche et dont l'exécution se fait par "enfilade" ou en brasant les conducteurs

bout à bout, on dispose les conducteurs généralement suivant un ordre bien déterminé.

En principe, leur isolement ne diffère guère de l'isolement à capote. Pour que les sections soient bien calées dans les encoches, on peut se servir de cales en bakélite ou en bois traité (fig. 57) tout comme pour les petits moteurs, mais de dimensions plus grandes. Aussi il y a lieu de prévoir un jeu en hauteur correspondant.

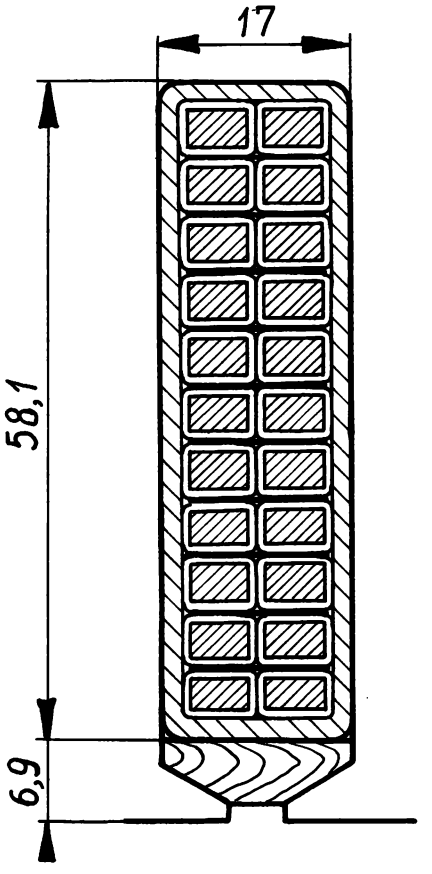


Fig. 57 – Cale de fermeture des sections brasées bout à bout.

En ce qui concerne l'enroulement exécuté par "enfilade", la composition de l'isolement d'encoche est très simple. Le conducteur a normalement un guipage de deux couches de coton. Pour que le guipage ne subisse pas de dommages lors du glissement du conducteur le long de l'encoche, on conseille de le faire passer préalablement dans un vernis d'imprégnation convenablement dilué.

L'isolement à la masse d'une encoche pareille est constitué d'une capote. Pour la haute tension on la prépare par le matrissage de micanite. Pour la basse tension on enroule une feuille mince de presspahn pour arriver à une épaisseur de 1,5 mm environ. Dans le cas extrême, l'emploi de papier huilé peut être toléré, on prépare ces capotes en repassant sur une forme pour arriver aux mêmes épaisseurs comme ci-dessus.

Pour que les capotes glissent dans les encoches sans entraves, leurs dimensions extérieures doivent être plus petites par rapport aux dimensions de l'encoche pour former un jeu nécessaire.

Pour que le processus d'enfilade se fasse dans de bonnes conditions, il est absolument nécessaire de prévoir des jeux importants dans la hauteur comme dans la largeur.

La valeur de ces jeux est d'autant plus grande que la section d'un conducteur est plus grande. En outre, plus on a de conducteurs par encoche, plus il faut augmenter la valeur du jeu. On comprend qu'il est difficile d'indiquer ces valeurs d'avance.

Plus on a l'espace non occupé par le cuivre dans une encoche, plus un moteur est mal utilisé. D'autre part les grands jeux entravent une transmission de chaleur de conducteur aux parois des encoches, d'où il s'en suit qu'il faut, dans la mesure du possible, tâcher de diminuer les jeux en question.

Chapitre 12

CALCUL DE LA LONGUEUR DE LA SPIRE MOYENNE D'UNE SECTION A FILS RONDS

Toute spire est constituée de deux parties droites dont la longueur est un peu plus grande que la longueur du fer, les canaux de ventilation y compris et de deux têtes en dehors du fer.

Sortant des encoches, tous les conducteurs indépendamment du genre de bobinage, ne peuvent être pliés directement pour aller rejoindre les conducteurs d'une encoche d'espace polaire voisin. Afin de pouvoir isoler convenablement les coudes on est amené de prolonger la partie droite en dehors du fer. La longueur de cette prolongation dépend de la grandeur du moteur et de sa tension de service. En outre, lorsque les conditions de mise en place ne sont pas favorables, on est obligé d'allonger la partie droite.

D'ailleurs, cette longueur ne dépend ni du pas polaire, ni du pas d'enroulement.

Il existe des tables et des formules approchées donnant la longueur de la tête d'enroulement, mais il est préférable de faire un tracé ou un calcul parce que de cette façon on a en même temps l'encombrement de têtes.

D'après la fig. 58, la largeur moyenne d'encoche sera :

$$l_m = \frac{l_1 + l_2}{2}$$

Il faut retrancher de cette valeur l'épaisseur double de l'isolant d'encoche environ 1,5mm pour avoir l'épaisseur de section en dehors du fer. Considérons que cette épaisseur coïncide avec le jeu entre les sections.

Dans ce cas : $\omega u = l_m$

D'autre part, définissons le diamètre moyen D_m comme égal à $D_e + H_e + 4$. Nous ajoutons 4mm pour tenir compte de la forme de l'encoche et de la cale de fermeture.

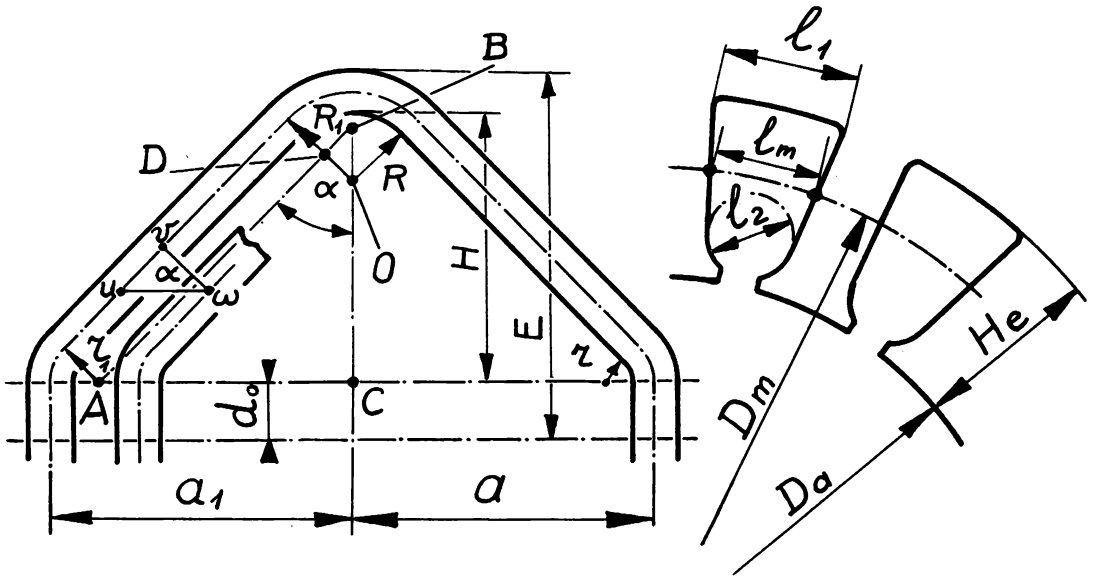


Fig. 58 – Tracé des têtes de bobines à fil rond d'un enroulement imbriqué.

Alors le pas moyen *wu* des têtes des bobines sera :

$$wu = \frac{\pi \times D_m}{N_1}$$

Lorsque *y* est le pas d'enroulement exprimé en nombre de dents embrassées par une section, la largeur a_1 en mm est égale au pas dentaire multiplié par le nombre de dents :

$$a_1 = \omega u \times \frac{y}{2} = \frac{\pi \times D_m}{N_1} \times \frac{y}{2}$$

Pour effectuer le tracé il reste à définir l'angle.

$$\text{Or } Cos\alpha = \frac{w_v}{w_u} = \frac{l_m \times N_1}{\pi \times D_m}$$

D'où l'on peut tirer sinα, tg α et α.

On peut s'arrêter là et achevant le tracé, mesurer le développement de la tête d'enroulement sur le dessin même. Mais on peut aussi calculer la partie en dehors du circuit magnétique. On a:

$$\overline{AC} = a_1 - r_1 = a_1 - \left(r + \frac{l_m}{2} \right)$$

En prenant $r = 5\text{mm}$ on a $\overline{AC} = a_1 - 5 - \frac{l_m}{2}$

Aussi :

$$\overline{AB} = \frac{\overline{A\,C}}{\sin \alpha}$$

$$\overline{BC} = \frac{\overline{A\,C}}{\operatorname{tg} \alpha}$$

$$\overline{OD} = R - r = R - 5$$

$$\overline{DB} = \frac{\overline{O\,D}}{\operatorname{tg} \alpha}$$

D'où $\overline{AD} = \overline{AB} - \overline{DB} = \dfrac{a_1 - 5 - \frac{lm}{2}}{\sin \alpha} - \dfrac{R - 5}{\operatorname{tg} \alpha}$

Finalement la longueur de la spire moyenne est égale à :

$$S_m = 2 \times L_f + 4\,d + 4\,\overline{AD} + \frac{\pi\, r_1\, \alpha + R_1\, (90° - \alpha)}{45}$$

A titre indicatif on peut suggérer les valeurs de rayons comme l'indique le tableau 14.

TABLEAU 14

Polarité de bobinage	R	R - r
2 pôles	20 mm	15 mm
4 pôles	12 mm	7 mm
6 pôles et plus	8 mm	3 mm

Ayant les données du calcul ci-dessus, il est aisé de calculer l'encombrement maximum de têtes d'enroulement. Ceci est particulièrement important pour les bobinages modifiés. Donc lorsqu'on n'a pas fait de tracé, on peut calculer :

$$\overline{OB} = \frac{\overline{O\,D}}{\sin} = \frac{R - 5}{\sin \alpha}$$

$$\overline{CO} = \overline{BC} - \overline{OB} = \frac{a_1 - \frac{lm}{2} - 5}{\operatorname{tg} \alpha} - \frac{R - 5}{\sin \alpha}$$

Pour la partie droite *d* on peut prendre les longueurs de 12,5 à 20mm pour l'isolement en classe A et de 20 à 27,5mm pour l'isolement en classe B. On doit aussi prendre en considération les dispositifs mécaniques de serrage de tôles avant de fixer une longueur quelconque.

Donc l'encombrement maximum de la tête est E_{max} :

$$E_{max} = d + \overline{CO} + R + lm - 1,5$$

Les données du calcul ci-dessus peuvent aussi servir pour dimensionner la forme de roulage de sections.

La fig. 59 montre que la partie droite de la forme de roulage = $L_f + 2d$; - la largeur de la forme = $2a = 2\,a_1 - lm + 1,5$ r = 5mm $H = \overline{CO} + R$ et l'épaisseur de la forme, délimitant la section en hauteur :

$$E_{pr} = \frac{H_e - 4}{2}$$

Pour l'enroulement imbriqué à une section par encoche, on doit prendre pour la longueur en dehors du fer de 10 à 15% de plus.

En ce qui concerne l'enroulement concentrique, il est très difficile d'établir des formules assez exactes vu que les sections prennent des dimensions et des formes trop diverses et que leur configuration dépend en grande partie de la construction de chaque moteur en particulier. Cette difficulté est la même pour l'enroulement à fil rond que pour le conducteur méplat (sections coupées

à conducteurs tirés). Il est plus sûr de relever la longueur de tête suivant le croquis de l'enroulement. Toutefois pour le calcul préliminaire on peut se baser sur la formule (27) donnant la longueur de la spire moyenne:

$$S_m = 2\ (\ Lf + 1{,}4\ \tau + A)\ en\ mm \qquad (27)$$

où $\tau = \frac{Dm}{2P}$ est le pas polaire et A = 20 à 100 mm suivant la grandeur et la tension du moteur.

Lors de l'établissement du croquis de l'enroulement concentrique, il y a lieu de prendre en considération des distances à la masse suivant la tension de service de la fig. 60 et du tableau 15.

TABLEAU N° 15

Tension entre phases en volts	A en mm	B en mm	C en mm
500	12	9	6
1000	16	14	8
2000	27	20	12
3000	36	25	15
4000	45	30	20
6000	66	38	28
9000	92	50	36
12000	112	60	45
15000	136	70	50

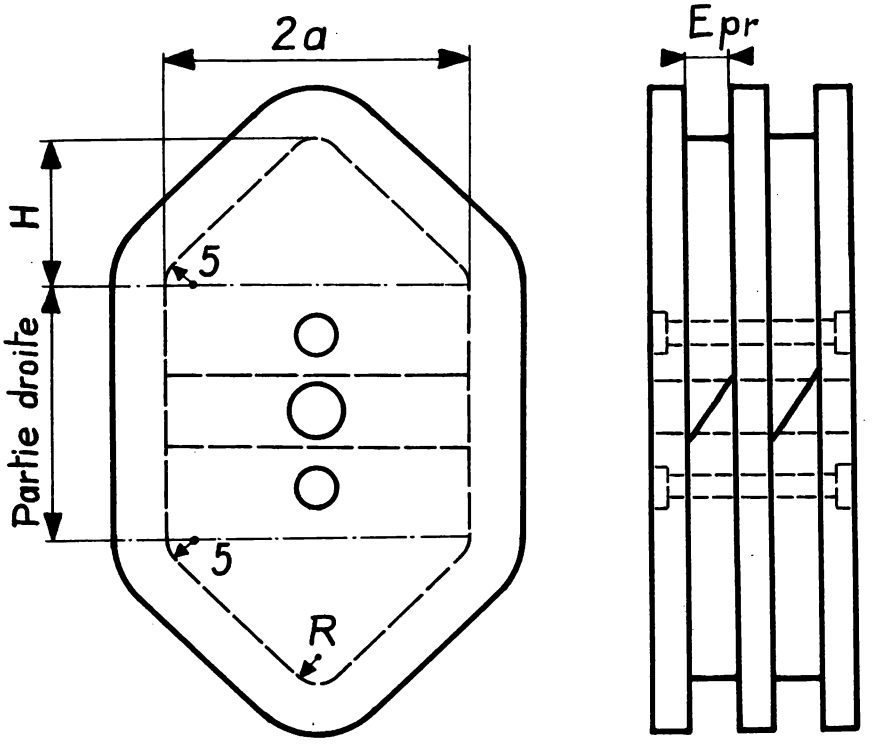


Fig. 59 – Forme de roulage des sections souples à fil rond.

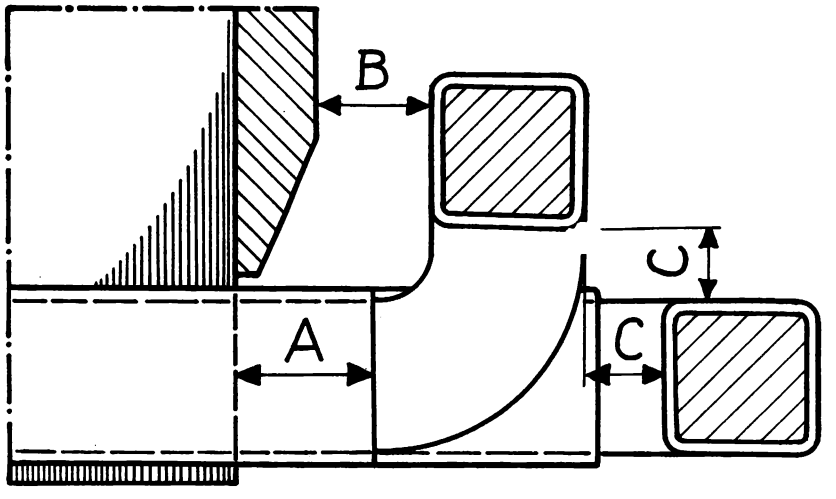


Fig. 60 – Distances à observer pour les têtes de bobines concentriques.

Chapitre 13

CALCUL DE LA LONGUEUR DE LA SPIRE MOYENNE D'UNE SECTION A CONDUCTEURS RECTANGULAIRES

Il est préférable pour sections à conducteurs rectangulaires comme pour sections à fils ronds, d'effectuer le tracé de la tête d'enroulement; du même coup on a l'encombrement du bobinage.
On commence par relever les côtés suivant la fig. 61.

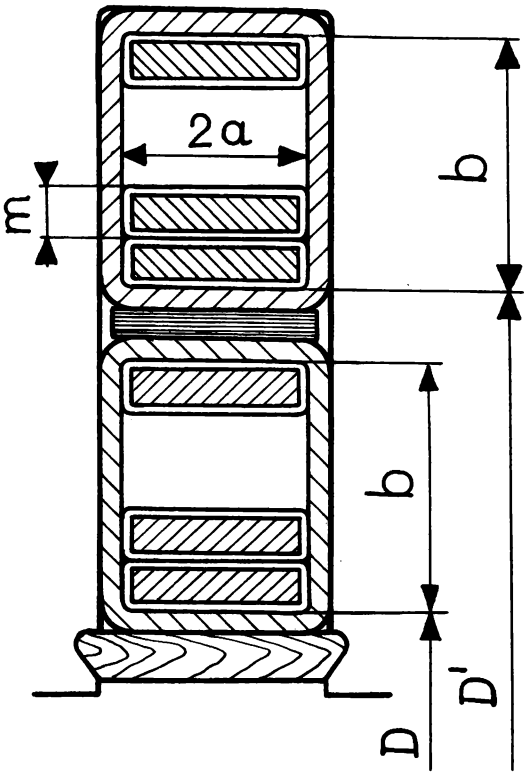


Fig. 61 – Relevé de cotes nécessaires pour le tracé d'une spire moyenne.

Puis on définit la largeur de la demi-section inférieure :

$$L = \frac{\pi D}{N} \times \frac{p}{2}$$

Où N est le nombre d'encoches et p le pas du bobinage en nombres de dents. De même la largeur de la demi-section supérieure est :

$$L_1 = \frac{\pi D'}{N} \times \frac{P}{2}$$

Alors il faut définir le rayon $r + a$ de la fig. 62.

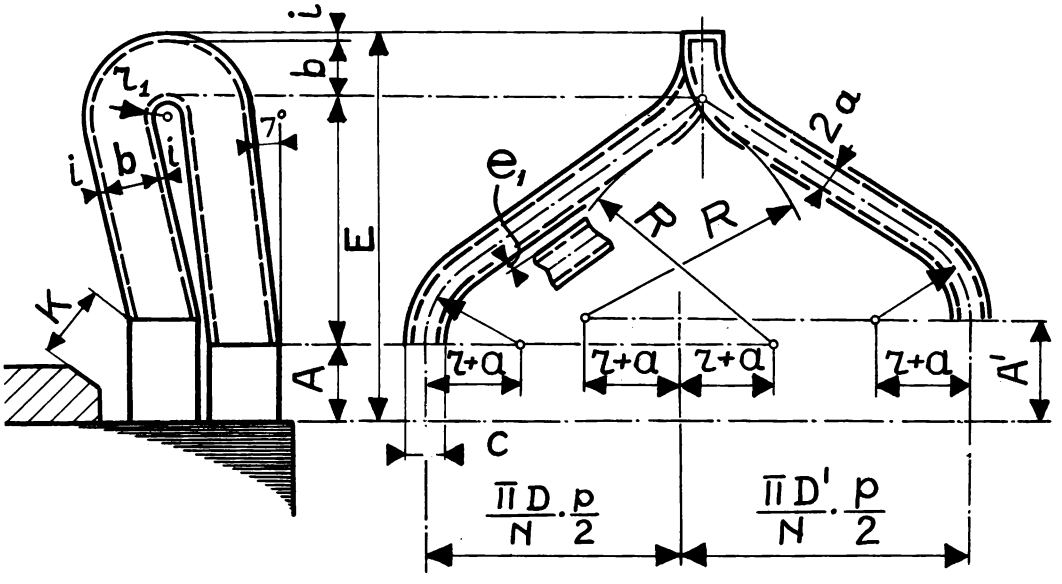


Fig. 62– Tracé d'une spire moyenne d'un enroulement statorique HT.

Suivant qu'on a un ou deux conducteurs en largeur, on prendra r égal à cinq ou quatre fois la largeur du conducteur nu, sans guipage.

Donc pour 1 conducteur en largeur : $r = 5 \times 2a$ et

" 2 conducteurs " " : $r = 4 \times 2a$

La largeur totale totale c de la section sera égale à 2 a + 2 i, où i est l'épaisseur simple de l'isolant. Si e_1 est le jeu entre les sections et y le pas en nombre de dents, on a pour le rayon R :

$$R = \frac{Y}{2}(c + e_1) + r$$

Des deux parties droites, A' doit être plus longue pour allonger les lignes de fuites à la masse.

Les valeurs de A et A' dépendent de la tension et du genre de moteur (ouvert, fermé ou entièrement fermé). On trouvera plus loin les valeurs de ces parties droites dans un tableau, ainsi que

d'autres renseignements concernant l'isolement de l'encoche et des sections. Avec les centres *M et N* on amorce les circonférences avec rayon *R*, ce qui définit l'inclinaison des demi-sections.

A partir du point d'intersection en *O* on met la valeur de *b* et puis *i*. La valeur de *b* est égale au produit du nombre de conducteurs par section par l'épaisseur d'un conducteur (l'isolement du conducteur y compris) et par le coefficient 1,03.
Ce dernier tient compte du remplissage des conducteurs.
La valeur de *b* comprendra éventuellement les intercalaires minces (de 0,2 mm) entre les conducteurs.
Finalement, si *m* est l'épaisseur du conducteur avec son isolant et *n* le nombre de conducteurs par section, la valeur de *b* sera égale à :

$$(m \times n \times 1{,}03) + (n - 1) \times 0{,}2$$

Ayant terminé le tracé on a directement l'encombrement maximum de la tête de l'enroulement par la valeur de *E* (voir fig. 62).

En supposant que ces têtes sont inclinées de 7° par rapport à l'entrefer et en choisissant la valeur de r_1 entre 7 à 12 mm, on peut tracer la tête de l'enroulement en profil et contrôler son encombrement vis-à-vis de la carcasse, de la flasque de serrage de tôles et vis-à-vis des paliers. En ce qui concerne la spire moyenne, on peut relever la longueur sur le tracé, en y ajoutant le développement de la boucle:

$$(r_1 + \frac{b}{2})$$

Généralement les sections en cuivre rectangulaire comme ci-dessus sont des sections à haute tension de service dépassant 1000 volts. On peut suggérer pour les dimensions d'isolement le tableau 16 donnant les dimensions d'isolement des encoches des machines ouvertes et fermées.
D'autres valeurs peuvent être utilisées suivant la disponibilité en isolants et suivant les conditions d'utilisation. Toutefois elles ne doivent pas s'écarter sensiblement des valeurs indiquées.

Les moteurs entièrement fermés ayant double circuit de ventilation, ont généralement très peu d'espace entre le circuit magnétique et les paliers, les parties droites sont donc plus courtes. D'autre part, l'isolement des têtes et des encoches étant moins exposé, peut être plus mince, ce qui est aussi favorable au point de vue de l'écoulement de la chaleur.

Donc si les dimensions d'isolement de ces moteurs sont réduites, les jeux entre les sections le sont aussi.
Les valeurs du tableau 17 donnent l'ordre de grandeur des dimensions dans ce cas.

L'isolement des têtes des sections est le même pour les moteurs fermés et ouverts, comme pour les moteurs entièrement fermés, sauf le jeu entre sections, comme l'indique le tableau 18.

Tension aux bornes : U en volts	Epaisseurs simples d'isolement de sections		Epaisseur de la cale intermédiaire	Cote "K" donnant la distance minimum à la masse	Prolongation de la capote en dehors du fer		Parties droites en dehors du fer			
							Cotes avec enrubannage		Cotes avec capote	
	Capote	Enrubannage			Demi-section inférieure	Demi-section supérieure	A	A_1	A	A_1
1000	1	1,6	2	10	25	35	20	30	31	41
1000 <U≤ 2000	1,2	1,6	3	10	"	"	"	"	"	"
2000 <U≤ 2600	1,4	1,8	3	13	30	40	25	35	36	46
2600 <U≤ 3200	1,6	2,0	3	16	"	"	"	"	"	"
3200 <U≤ 3600	1,8	2,2	4	18	37	47	30	40	45	55
3600 <U≤ 4600	2,2	2,4	4	23	"	"	"	"	"	"
4600 <U≤ 5600	2,6	2,6	5	28	44	54	35	45	52	62
5600 <U≤ 6600	3	3	5,5	33	55	65	40	50	65	75

Tableau 16. Dimensions d'isolement des encoches de machines ouvertes et fermées.

Tension aux bornes : U en volts	Epaisseurs simples d'isolement de sections		Epaisseur de la cale intermédiaire	Cote "K" donnant la distance minimum à la masse	Prolongation de la capote en dehors du fer		Parties droites en dehors du fer			
							Cotes avec enrubannage		Cotes avec capote	
	Capote	Enrubannage			Demi-section inférieure	Demi-section supérieure	A	A_1	A	A_1
1000=U≤1500	1	1,6	2	8	20	30	15	25	23	33
1500<U≤2600	1,2	1,6	3	10	27	37	22	32	30	40
2600<U≤3200	1,4	1,8	3	13	"	"	"	"	"	"
3200<U≤3600	1,6	2,0	4	15	32	42	28	38	35	45
3600<U≤4600	2	2,2	4	18	"	"	"	"	"	"
4600<U≤5200	2,4	2,4	5	20	35	45	30	40	38	48
5200<U≤5600	2,6	2,6	5	22	"	"	"	"	"	"
5600<U≤6600	3,0	3,0	5,5	27	46	56	36	46	49	59

Tableau 17. Dimensions d'isolement des encoches de machines entièrement fermées.

Tension aux bornes: U (en volts)	Classe A		Classe B		Jeu minimum entre sections	
	Epaisseur simple d'isolant	Nature d'isolant	Epaisseur simple d'isolant	Nature d'isolant	Moteurs ouverts	Moteurs entièrement fermés
1000 =<U≤ 2500	1,1	2 rubans huilés de 0,2 mm à demi-recouvrement	1,0	1 ruban soie de verre de 0,13mm à demi-recouvrement et 1 ruban huilé à demi-recouvrement.	3	2,8
2500 <U≤ 4200	1,7	3 rubans huilés de 0,2 mm à demi-recouvrement	1,5	2 rubans soie de verre de 0,13mm à demi-recouvrement et 1 ruban huilé de 0,2 mm à demi-recouvrement.	4	3
4200 <U≤ 5200	2,3	4 rubans huilés de 0,2 mm à demi-recouvrement	1,9	3 rubans soie de verre de 0,13mm à demi-recouvrement et 1 ruban huilé de 0,2 mm à demi-recouvrement.	5	3,4
5200 <U≤ 6600	2,8	1 ruban huilé de 0,2mm, 2 rubans huilés de 0,3mm & 1 ruban huilé de 0,2mm Tous à demi-recouvr.	2,3	4 rubans soie de verre de 0,13mm à demi-recouvrement et 1 ruban huilé de 0,2 mm à demi-recouvrement.	5,5	3,8

Tableau 18. Isolement des têtes de section à conducteurs rectangulaires H.T.

Chapitre 14

TRACE DE LA SPIRE MOYENNE D'UNE SECTION STATORIQUE OU ROTORIQUE A BARRES A BASSE TENSION

Ces enroulements n'ont pas de boucle pliée suivant un rayon *r* et la demi-section de la couche supérieure est réunie avec la demi-section de la couche inférieure par l'intermédiaire d'une chape.

Cette chape est constituée d'un tube en cuivre très mince, mais dont le périmètre est assez grand pour contenir les deux demi-sections et une cale de serrage (fig. 63). L'ensemble est soudé au bain d'étain.

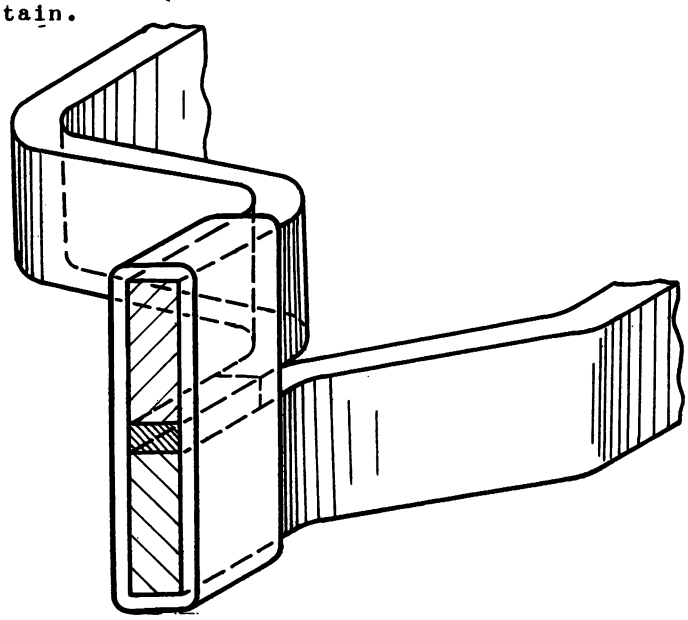


Fig. 63 - Chape de soudure de deux demi-sections à barres B.T.

Les enroulements de ce genre sont généralement à un, à deux ou à trois conducteurs par section. D'où trois façons d'exécuter leurs tracés.

Lorsque *y* est le pas d'une section en nombre de dents, la longueur développée d'une demi-section est :

$$\frac{\pi \times D_1}{N_1} \times \frac{y}{2}$$

et la longueur développée de sa demi-section complémentaire est :

$$\frac{\pi \times D_2}{N_1} \times \frac{y}{2}$$

Le rayon R définissant l'inclinaison de têtes est donné par la formule ci-dessous :

$$R = (2a + 3\ mm)\ \frac{y}{2} + 6\ mm$$

Les 3 mm comprennent le jeu entre les sections et l'épaisseur double d'isolant de la tête de section. Les 6 mm représentent le rayon de courbure de la demi-section à la sortie de l'encoche. Le restant du tracé est clair suivant la fig. 64.

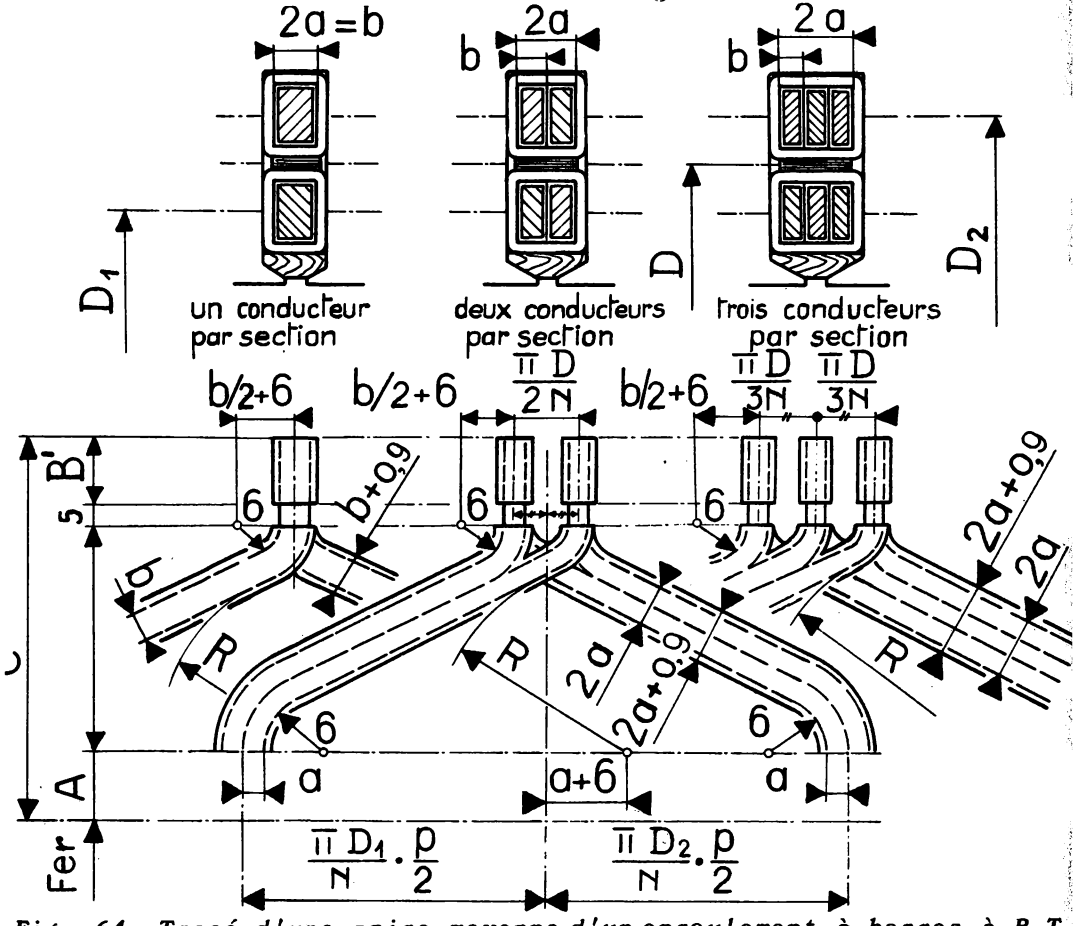


Fig. 64- Tracé d'une spire moyenne d'un enroulement à barres à B.T.

La largeur d'une chape B et la longueur d'une partie droite A varient suivant le tableau 19.

Tableau 19

Cotes en mm	Jusqu'à 20 kW	21 à 30 kW	31 à 50 kW	51 à 90 kW	91 à 180 kW	181 kw et plus
A	10	15	20	20	20	25
B	10	12	15	18	20	20

Pour relever la longueur de la spire moyenne, il suffit de suivre le parcours de la spire au compas à pointes-sèches ou avec un fil.

Les conducteurs en barres des moteurs de moyenne puissance et à basse tension ne peuvent pas être guipés au coton pour la raison que sur la grande dimension le serrage de fils n'est pas suffisant et les claquages sont à craindre. Alors on est obligé d'effectuer l'isolement de ces barres par un enrubannage à jaconas pour la classe *B*. La largeur de ce ruban peut varier de 10 à 20 mm suivant la hauteur des barres. Une couche de ruban jaconas de 0,12 mm d'épaisseur et à demi-recouvrement donne 0,6 mm de surépaisseur double. Une couche de ruban à soie de verre donne 0,5 mm de surépaisseur double.

Lorsque les têtes des sections sortent non isolées de l'encoche, on doit les isoler avec un ruban à demi-recouvrement. En plus, une des barres à chaque changement de phase doit être isolée d'un carton lustré de 1,5 mm sous un ruban supplémentaire jointif.

Lorsqu'il s'agit des grands moteurs à basse tension il est conseillé d'isoler toutes les têtes de sections, même si elles sortent isolées de l'encoche, avec une couche de ruban supplémentaire. En plus, une des barres à chaque changement de phase doit être isolée avec un carton lustré de 1,5 mm sous un ruban jointif supplémentaire lorsque les têtes sortent non isolées de l'encoche et avec un carton lustré de 1,5 mm sous un ruban à demi-recouvrement lorsque les têtes sortent isolées de l'encoche.

On peut utiliser un ruban jaconas de 0,18 mm d'épaisseur pour la classe *A* et un ruban en soie de verre de 0,13 mm d'épaisseur pour la classe *B*.

Chapitre 15

CALCUL DU POIDS ET DE LA RESISTANCE D'UN ENROULEMENT

Lorsque l'enroulement est défini et qu'on passe à l'exécution, les renseignements concernant les dimensions du conducteur, doivent nécessairement être complétés par l'indication du poids de ce conducteur pour qu'on puisse l'approvisionner en temps utile.

Le volume d'une spire moyenne peut être exprimé par le produit de trois valeurs :

$$\frac{c_p \times s_c \times Sm}{1000} \text{ en } dm^3$$

où c_p est le nombre de conducteurs en parallèle, s_c la section d'un conducteur en millimètres carrés et Sm la longueur d'une spire moyenne exprimée en mètres.

Cette spire pèsera :

$$\frac{8{,}9 \times c_p \times s_c \times Sm}{1000} kg$$

Si n_1 est le nombre de spires en série par phase, le nombre total de spires est $3n_1$ dans un enroulement dont les sections sont en série, mais lorsque chaque phase à x circuits en parallèle, on a $3n_1x$ spires au total, et le poids complet d'un enroulement devient :

$$P = \frac{8{,}9 \times c_p \times s_c \times S_m}{1000} \times 3 \times n_1 \times x = 26{,}7 \times c_p \times s_c \times S_m \times n_1 \times x \times 10^{-3} \text{ kg.}$$

Ce poids représente le poids net du cuivre et il ne comprend pas les connexions entre les sections, ainsi que les chutes inévitables de rognures lors de la préparation.

Donc il est nécessaire, de prévoir le surplus. Ce surplus dépend des conditions de production. On peut prendre de 5 à 10% du poids net. Plus on a de machines identiques à bobiner moins peut être le surplus.

Pour le guipage en coton, en soie, en soie de verre ou en amiante de conducteur méplat, on peut majorer le poids net de 4%.

Dans le cas d'utilisation de fil rond guipé, ayant le diamètre d, sans isolant et le diamètre d_i avec isolant, le poids Pg avec guipage peut être défini suivant la formule :

$$Pg = P\left[0{,}876 + 0{,}124\left(\frac{di}{d}\right)^2\right] kg$$

Le poids d'un enroulement en aluminium est donné par la formule :

$$P = 8{,}1 \times c_p \times s_c \times Sm \times x \times 10^{-3} kg$$

La spécification d'un enroulement est incomplète, si elle ne mentionne pas la valeur de la résistance d'une phase.

On sait que la résistance r d'un conducteur métallique, ayant sa section constante, est proportionnelle à sa longueur l et inversement proportionnelle à la surface de sa section s_c. Le coefficient de proportionnalité ρ, appelé aussi le coefficient de résistivité spécifique est égal à la résistance du conducteur en question ayant la longueur d'un mètre et la section d'un millimètre carré à la température de 15° C :

$$r_c = \rho\frac{1}{s_c} \ ohms$$

où ρ pour cuivre rouge pour bobinages électriques est égal à :

$$\rho = \frac{1}{57} = 0{,}0175 \ ohms \ par \ mm^2/\ m$$

Pour que le résultat soit exprimé en *ohms*, il est nécessaire que la longueur l soit prise en mètres et la section s_c en millimètres carrés.

La longueur totale du conducteur d'une phase en mètres est le produit du nombre n_1 de spires en série par phase par la longueur de la spire moyenne Sm en mètres. La section totale est le produit de la section d'un conducteur s_c en mm^2 multiplié par le nombre de circuits en parallèle x et multiplié par le nombre de conducteurs en parallèle c_p. Alors la résistance d'une phase à 15° C est :

$$r_c = \frac{1}{57} \times \frac{n_1 \times Sm}{s_c \times x \times C_p} \ ohms$$

Pour le conducteur en aluminium la formule devient :

$$r_a = \frac{1}{34{,}5} \times \frac{n_1 \times Sm}{s_c \times x \times c_p} \ ohms$$

D'autre part, pour avoir la résistance à une autre température $t°_n$ il suffit d'appliquer la formule ci-dessous :

$$r_n = r_c \times \frac{234,5 + t°_n}{234,5 + t°c}$$

où r_n est la nouvelle résistance et r_c est la résistance connue à la température connue t°c.
Par exemple :

Si la résistance d'une phase d'un enroulement en cuivre est de 2 *ohms* à 20° *C*, cette résistance à 75° *C* devient :

$$r_{75°} = r_{20°} \times \frac{234,5 + 75}{234,5 + 20} = 2 \times \frac{309,5}{254,5} = 2,44 \text{ ohms},$$

lorsque l'enroulement est en aluminium, cette formule devient :

$$r_n = r_c \frac{245 + t°_n}{245 + t°_c}$$

Chapitre 16

DEFINITION APPROCHEE DE LA PUISSANCE UTILE

La puissance utile sur le bout d'arbre d'un moteur dépend de multiples facteurs, mais surtout de l'échauffement de son enroulement isolé en charge.

On considère qu'un moteur a une puissance nominale, soit en régime continu, soit en régime intermittent, lorsque l'échauffement de son enroulement statorique, ainsi que de son enroulement rotorique, lorsqu'il est à bagues, ne dépasse pas certaines limites.

Il est entendu que cela est réalisé lorsque la tension d'alimentation ainsi que sa fréquence restent constantes et que la température ambiante ne dépasse pas une certaine température normale, ordinairement 35° C.

Les limites d'échauffement mentionnées ci-dessus sont données par exemple par le tableau 20, extrait du règlement de la Commission Electrotechnique Internationale (affiliée à l'Organisation Internationnale de Normalisation : ISO).

La définition de la puissance nominale d'un moteur existant ne présente pas de difficultés de principes. L'essai en charge et la mesure soignée de la température d'enroulement résolvent complètement le problème. Mais lorsqu'un moteur n'existe pas, la fixation de sa puissance nominale lors du calcul présente des difficultés énormes, parce qu'il n'est pas possible de prédéterminer avec précision l'échauffement d'un enroulement en charge seulement par le calcul, surtout quand cela concerne des moteurs de puissance relativement petite.

Pour cette raison on est amené à comparer le moteur en étude avec les données des essais accumulés durant de nombreuses années d'expérience avec divers moteurs asynchrones.

La méthode par comparaison la plus simple, quoique approchée, consiste en estimant la puissance nominale d'un moteur, en se basant sur le choix de la densité admissible de courant dans son enroulement statorique.

Par la densité de courant δ_c on entend le quotient de l'intensité de courant nominal I_1 dans un enroulement par la section de son conducteur s_c.

Dans le cas de x circuits en parallèle et c_p conducteurs en parallèle, la densité de courant devient :

$$\delta_c = \frac{I_1}{s_c \times x \times c_p} \quad A/mm^2$$

L'expérience montre que la densité du courant à laquelle l'échauffement d'un enroulement atteint les limites admises, dépend peu des dimensions du moteur, mais par contre, qu'elle dépend énormément d'une série d'autres facteurs, et en premier lieu du genre de la construction.

La valeur de δ_c est plus grande pour les moteurs ouverts et fermés et plus petite pour les moteurs entièrement fermés et blindés.

Elle dépend aussi du système et de l'importance de la ventilation. La valeur de δ_c est autant plus grande que le débit d'air refroidissant la machine à l'intérieur ou à l'extérieur est plus grand.

La distribution adéquate de cet air le long des surfaces chauffées permet d'augmenter la valeur de δ_c.

Finalement la qualité et la quantité d'isolant utilisé ont une influence de leur côté sur la valeur de la densité du courant. Cette dernière peut être admise plus grande, lorsque l'isolant de la section dans l'encoche comme en dehors de l'encoche, est plus mince et plus conducteur de la chaleur.

La tendance, d'utiliser des matières isolantes de qualité supérieure permettant de diminuer leurs épaisseurs et d'améliorer le coefficient de transmission de la chaleur, se justifie pleinement. Il en résulte non seulement le gain en section utile dans l'encoche, donc en section du conducteur, mais aussi la possibilité d'augmenter la densité de courant admissible. On sait que l'un comme l'autre contribue à la majoration de la puissance nominale.

La présence de poches d'air entre les couches de matière isolante les rends calorifuges. Donc lorsqu'un enroulement est bien

imprégné et étuvé à vide, on peut augmenter la valeur de la densité de courant admissible.

Le tableau 21 donne les valeurs de la densité de courant qu'on peut préconiser pour l'utilisation dans les moteurs asynchrones de constructions et de ventilations diverses.

Toutefois, ce tableau n'est valable que pour les isolements usuels dont la liste est donnée par le tableau 22 et à condition que ces enroulements soient suffisamment imprégnés et étuvés à vide.

De toute façon, les indications de ce tableau sont approximatives et on ne doit les utiliser qu'avec réserve. Tout rebobineur peut y apporter les corrections en effectuant des relevés systématiques et nombreux des échauffements lors des essais en charge. Cela permettra de coordonner les limites de densité de courant avec les disponibilités de matières isolantes et la qualité du traitement utilisé.

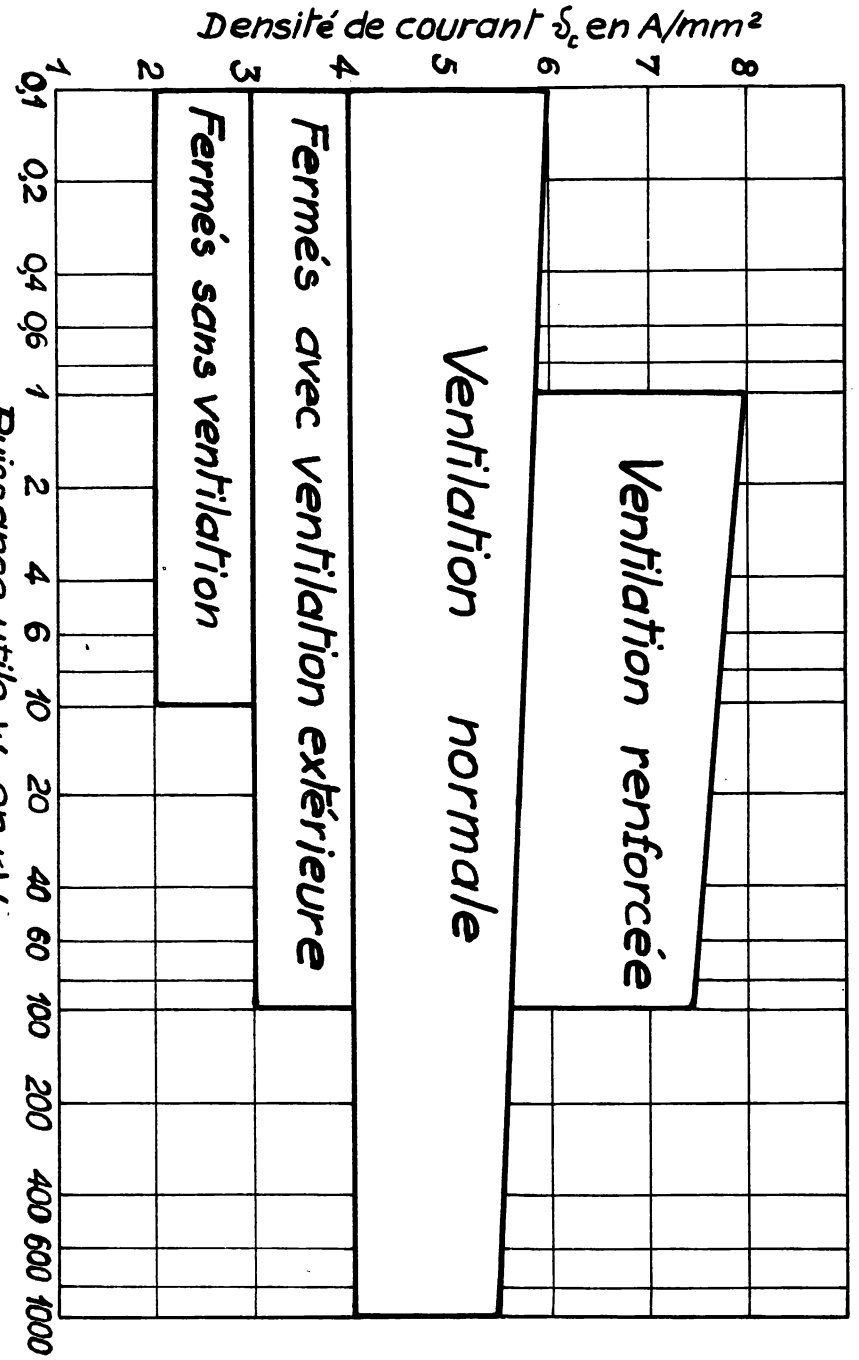
Cependant, on commettrait une faute grave si on comptait seulement sur la densité de courant δ_c et surtout dans le cas de machines de très ancienne construction.

Lorsqu'on compare deux encoches de même forme, mais de dimensions différentes, et lorsque ces encoches portent des conducteurs, tels que leurs coefficients de remplissage r_m sont les mêmes, ainsi que les densités de courant δ_c, on constate que, toute chose égale d'ailleurs (ventilation etc.) l'enroulement de la grande encoche a la tendance de s'échauffer plus et cela, suite à l'évacuation plus difficile de la chaleur des conducteurs.

En effet, lorsque les dimensions d'une encoche augmentent, sa surface périphérique servant à transmettre la chaleur développée dans les conducteurs, n'augmente que directement proportionnellement aux dimensions, mais la surface de l'encoche, donc aussi la quantité de chaleur développée augmente proportionnellement à la deuxième puissance des dimensions. Ainsi l'augmentation de la surface de transmission de chaleur retarde par rapport à l'augmentation de la chaleur développée.

Si la transmission de la chaleur est entravée, cela causera une augmentation de la température au sein de l'encoche.

TABLEAU 21


Densité de courant δ_c en A/mm²
1
2
3
4
5
6
7
8
Fermés sans ventilation
Fermés avec ventilation extérieure
Ventilation normale
Ventilation renforcée
Puissance utile W_u en kW
0,1
0,2
0,4
0,6
1
2
4
6
10
20
40
60
100
200
400
600
1000

	Par thermomètre	Par résistance
Classe A	50° C	60° C
Classe B	65° C	80° C

Tableau 20

POSTE	DESIGNATION D'ISOLANT	EMPLOYE DANS	Epaisseur nominale	Poids d'un metre carré en gr.	Poids spécifique gr/cm3
1	Papier japon	Support de micanite et de mica-ruban. Isolement de spires. (doit être imprégné)	0,025	15	—
2	Papier dur (Craft)	Protection de section dans l'encoche. (doit être imprégné)	0,12	100	0,8
3	Papier huilé	Préparation de capotes jusqu'à 600 volts. Isolement entre spires.	0,13 à 0,15	110 à 120	1,2
4	Papier dynamo à coller	Isolement entre les tôles magnétiques.	0,03	20	—
5	Carton "presspahn"	Capotes jusqu'à 600 volts et cavalier des encoches.	0,1 à 0,5	—	1,2
6	Carton "presspahn glacé"	Capotes des encoches semi-fermées. Isolement entre spires et entre couches.	0,1 à 2.0	—	1,2
7	Carton "leatheroïde"	Capotes.	0,1 à 0,4	—	1,3
8	Ruban diagonal	Isolement des têtes de sections.	0,3	—	—
9	Ruban huilé (jaune)	Isolement des sections en barres et en méplat dans le fer et en dehors. Isolement des connexions et des sorties d'enroulements.	0,15 à 0,3	—	1,15
10	Ruban huilé (noir)	Isolement des têtes de bobines de sections rigides (barres et méplats).	0,3	—	1,15
11	Ruban jaconas (extra fine et moyenne)	Isolement de spires de têtes de sections. Protection de sections en barres, de connexions et de sorties.	0,11 0,18	—	—
12	Ruban en soie naturelle	idem	0,18 à 0,22	—	—
13	Toile huilée jaune	Isolement des sections dans le fer. Isolement des sections roulées. Isolement entre phases.	0,15 à 0,4	—	1,15
14	Toile huilée noire	Isolement des sections dans le fer.	0,3	—	1,15
15	Ruban mica-papier	Isolement des spires et des sections à barres et à méplats dans le fer et en dehors.	0,13 à 0,17	—	1,5 à 1,6
16	Micanite élastique	Capotes et intercalaires entre spires dans le fer.	0,15 à 0,5	—	1,9
17	Micanite rigide	Intercalaires entre spires et couches dans le fer.	0,5 à 10	—	2,0
18	Micafolium	Capotes de tous genres.	0,12 à 0,25	—	1,4
19	Ruban soie de verre	Isolement de spires. Doit être imprégné.	0,08 0,10 0,13	120 150 200	—
20	Bakelite, ébonite, fibre	Cales d'encoches.	—	—	1,4

TABLEAU 22 MATIERES ISOLANTES

D'autre part, si on compare les encoches de dimensions identiques, mais les unes disposées plus serrées que les autres, les premières, à toutes autres conditions égales, s'échaufferont plus et cela en vertu du principe que la chaleur développée dans un volume statorique est plus grande, mais par contre, la surface de refroidissement du stator reste la même.

Pour les raisons ci-dessus on a introduit, à juste titre, encore une grandeur caractéristique permettant de contrôler le bon choix de la densité du courant, bien entendu toujours sur la base de la comparaison des essais d'une grande série de machines du même genre de construction.

Cette grandeur caractéristique est désignée par le symbole double *AC* et est connue sous le nom de "charge linéaire". Elle représente le produit du courant dans un conducteur par le nombre de conducteurs, par un centimètre de longueur de périphérie d'alésage du stator.

Lorsque l'alésage est représenté par D_a, le nombre d'encoches par N_1 et le nombre de conducteurs dans chaque encoche par le symbole c_e; si I_1 est l'intensité de courant par phase et qu'il y a x circuits en parallèle, on a la charge linéaire, selon sa définition, en ampères par centimètre :

$$AC = \frac{N_1 \times c_e \times I_1}{\pi \times D_a \times x} \qquad (28)$$

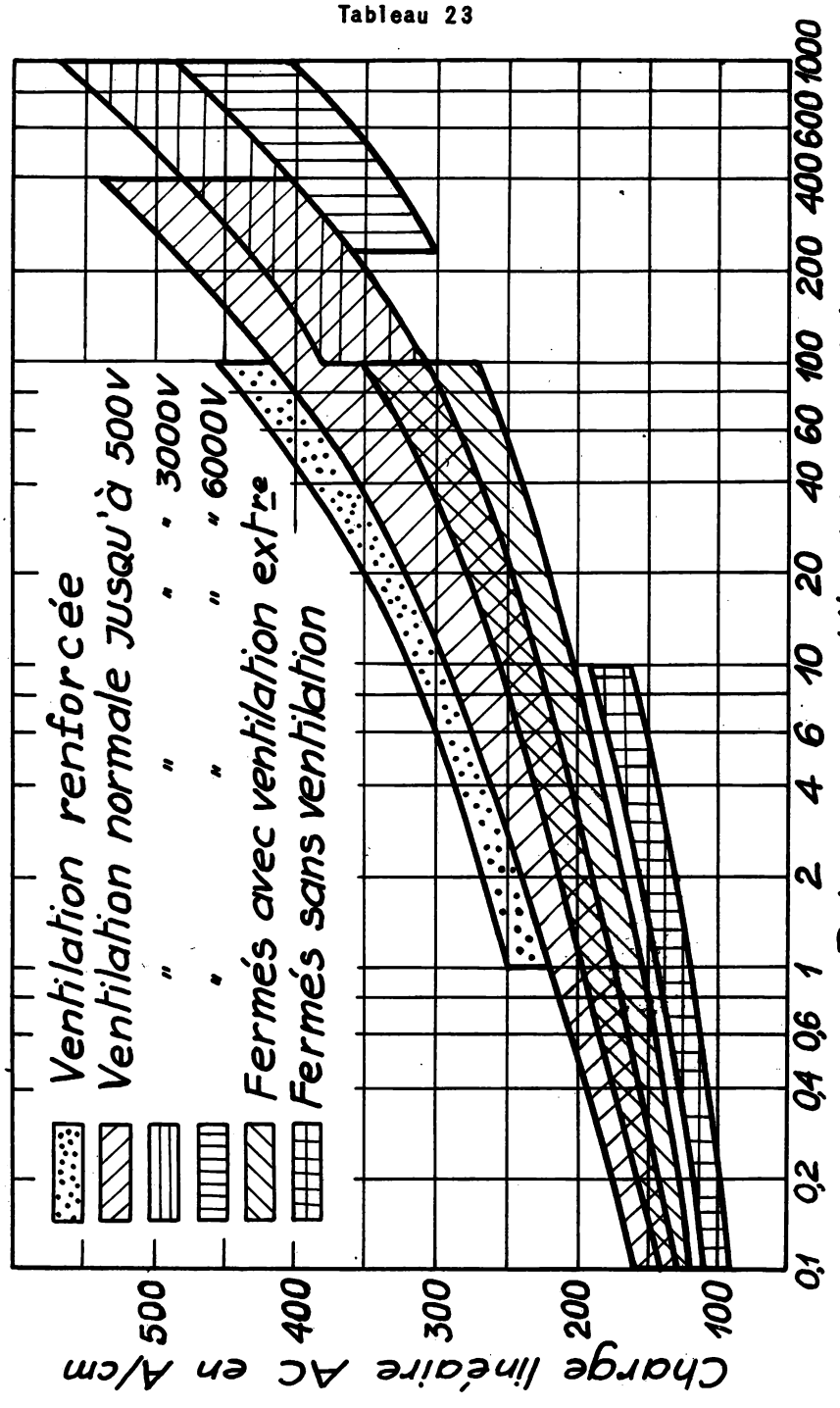
Plus un moteur est grand et tourne plus vite qu'un autre, plus grande peut être admise la valeur de la charge linéaire. Tout comme avec la densité de courant, elle peut être admise plus grande, lorsque la ventilation est meilleure et lorsque la tension nominale est plus basse.

Le tableau 23 donne les charges linéaires pour les moteurs de divers types.

En admettant la densité de courant δ_c et en connaissant la section de conducteur s_c et le nombre de circuits en parallèle x, ainsi que le nombre de conducteurs en parallèle c_p, on peut trouver la valeur nominale estimée du courant statorique :

$$I_1 = s_c \times \delta_c \times x \times c_p$$

Tableau 23


Ventilation renforcée
Ventilation normale jusqu'à 500v
" " " 3000v
" " " 6000v
Fermés avec ventilation extre
Fermés sans ventilation
Charge linéaire AC en A/cm
500
400
300
200
100
0,1 0,2 0,4 0,6 1 2 4 6 10 20 40 60 100 200 400 600 1000
Puissance utile Wu en kW

Comme la puissance en courant alternatif triphasé est proportionnelle à l'intensité de ce courant, à la tension d'alimentation et au facteur de puissance donné par le cosinus de l'angle de décalage entre la tension et le courant, on peut exprimer la puissance électrique en watts par l'expression :

$$W_a = \sqrt{3}\ U\ I_1 \cos\varphi$$

Cette expression représente donc la puissance absorbée par un moteur à la ligne d'alimentation. Une partie de cette puissance est dépensée pour couvrir une série de pertes propres au moteur, le reste peut être récupéré en bout d'arbre comme puissance utile W_u. Le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée est appelé le rendement et est généralement exprimé en pour-cent:

$$r_d = \frac{W_u}{W_a} \times 100$$

de sorte que la puissance utile d'un moteur est exprimé par :

$$W_u = \frac{r_d}{100} \times W_a = \frac{r_d\ \sqrt{3}\ U\ I_1 \cos\varphi}{100} \qquad (29)$$

On a vu que le courant I_1 peut être défini, la tension U étant connue, il reste à fixer le rendement r_d et le facteur de puissance cos φ.

Une fois de plus on a recours aux résultats d'essai recueillis au cours de nombreuses années de pratique.

Les tableaux 24, 25, 26 et 27 donnent les courbes de rendement et les facteurs de puissance cosφ considérés comme normaux pour les moteurs dont les puissances apparentes se situent entre 0,2 et 1000 kVA et dont les vitesses sont entre 600 et 3000 tr/min.

Ces valeurs sont conformes aux diverses normes en vigueur pour les moteurs asynchrones et sont les résultats de très nombreuses observations.

On peut les considérer comme vraisemblables, pour toute machine de construction assez récente. Même, si on commet une erreur lors du choix de chaque coefficient à part, la valeur du produit de ces deux coefficients peut être considérée comme suffisamment ca-

Tableau 24

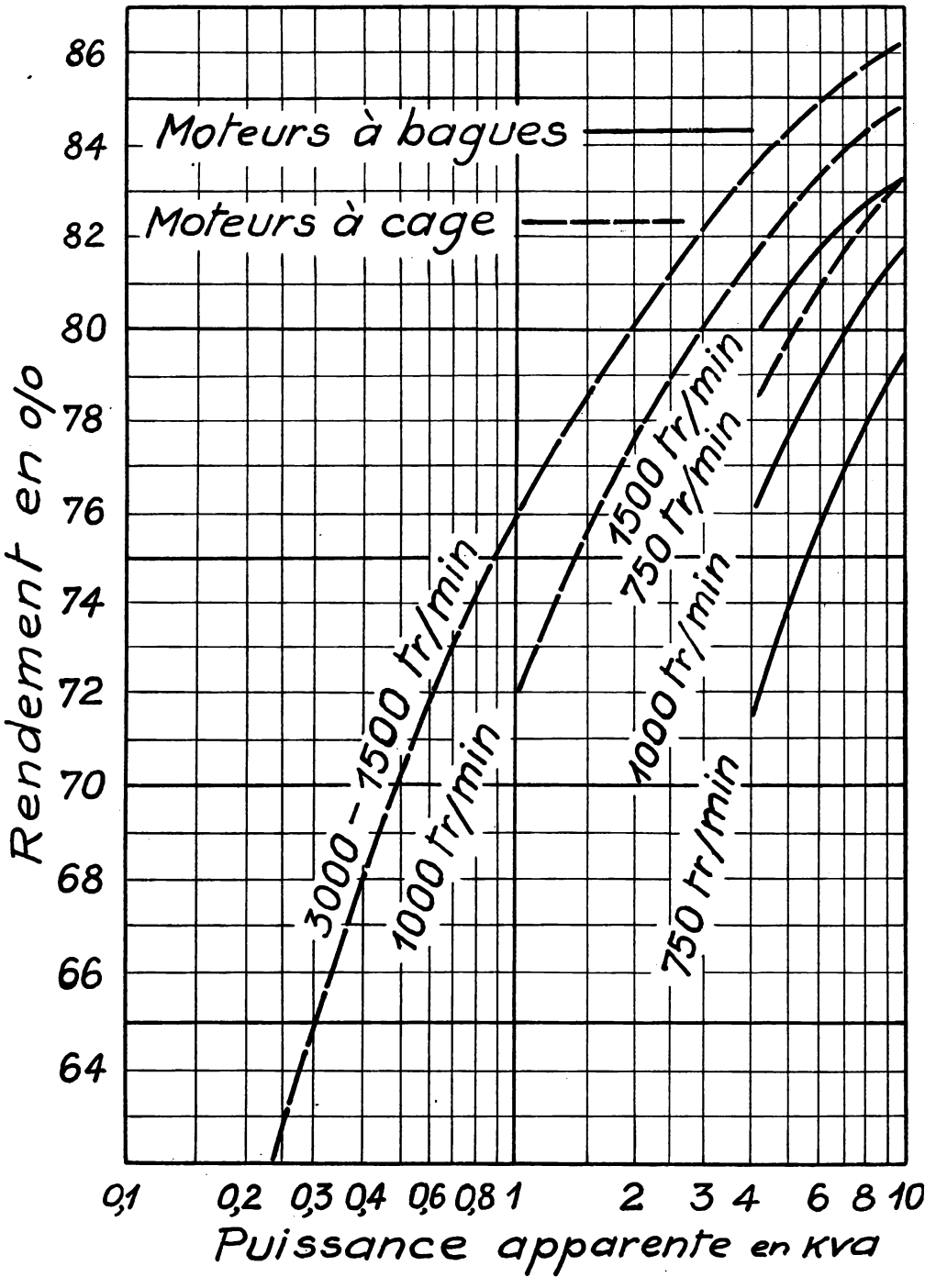

Moteurs à bagues
Moteurs à cage
Rendement en o/o
86
84
82
80
78
76
74
72
70
68
66
64
3000 - 1500 tr/min
1000 tr/min
1500 tr/min
750 tr/min
1000 tr/min
750 tr/min
0,1
0,2
0,3
0,4
0,6
0,8
1
2
3
4
6
8
10
Puissance apparente en kva

Tableau 25

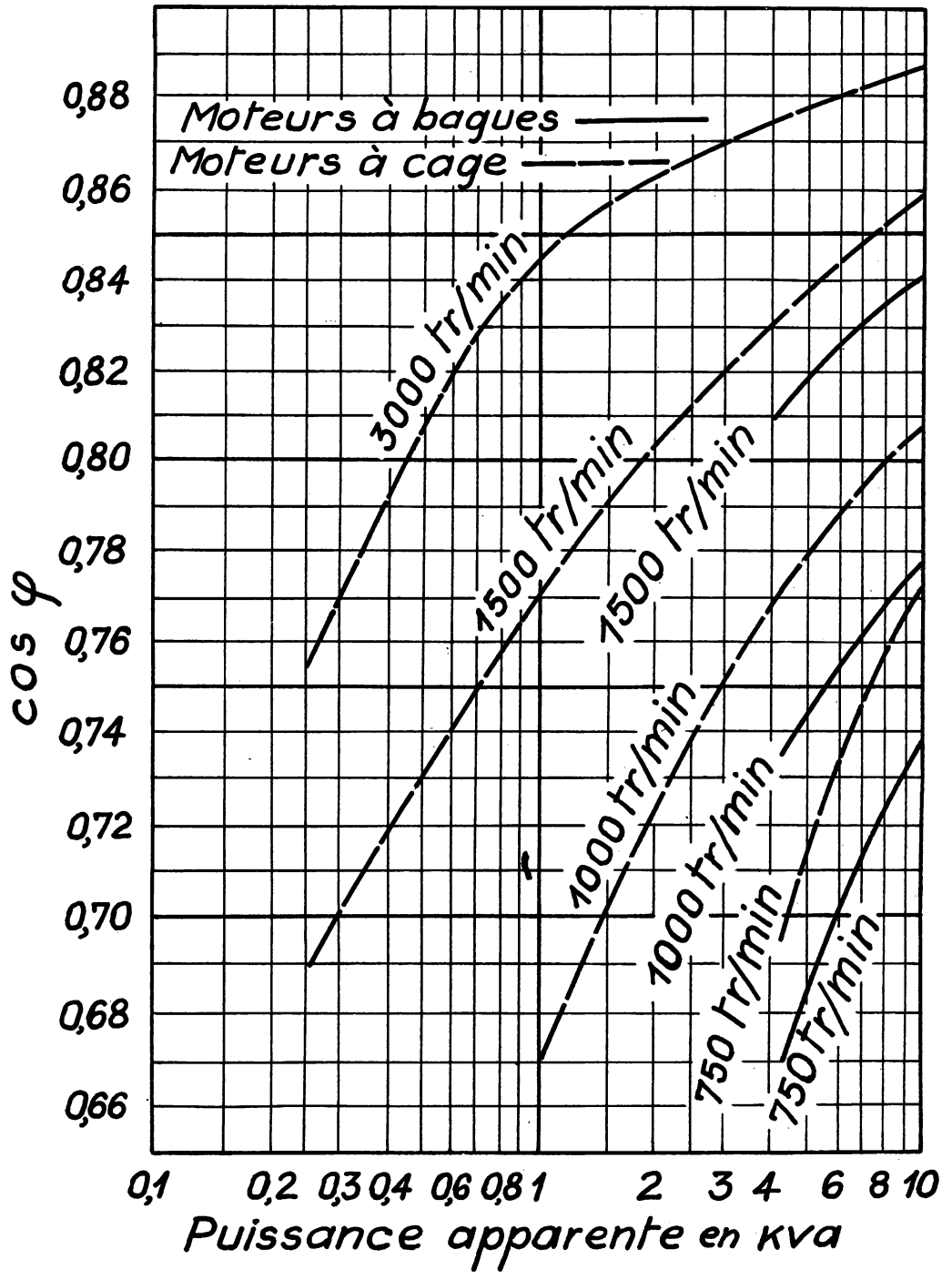

0,88
0,86
0,84
0,82
0,80
0,78
0,76
0,74
0,72
0,70
0,68
0,66
cos φ
Moteurs à bagues
Moteurs à cage
3000 tr/min
1500 tr/min
1500 tr/min
1000 tr/min
1000 tr/min
750 tr/min
750 tr/min
0,1
0,2
0,3
0,4
0,6
0,8
1
2
3
4
6
8
10
Puissance apparente en kva

TABLEAU 26

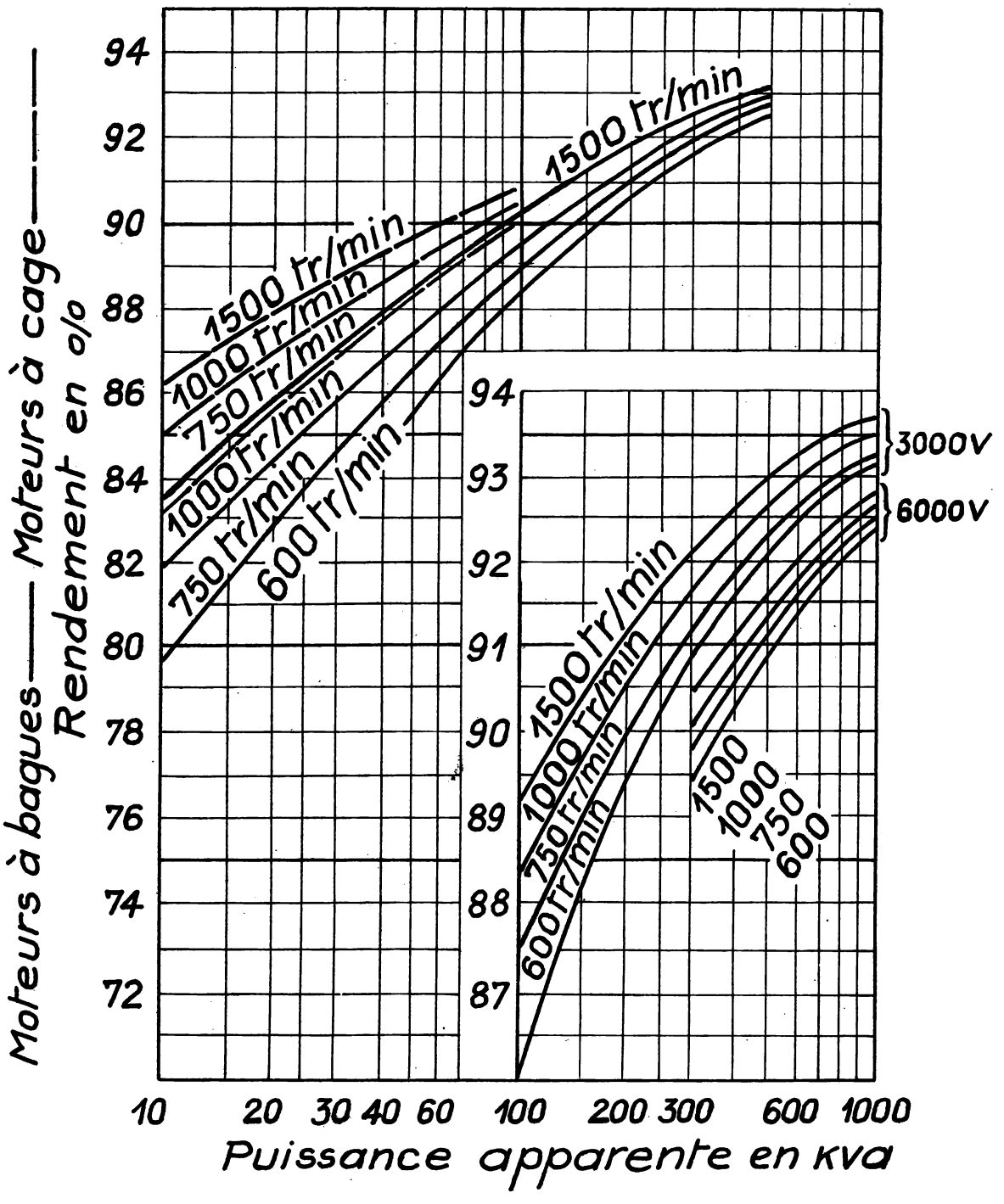
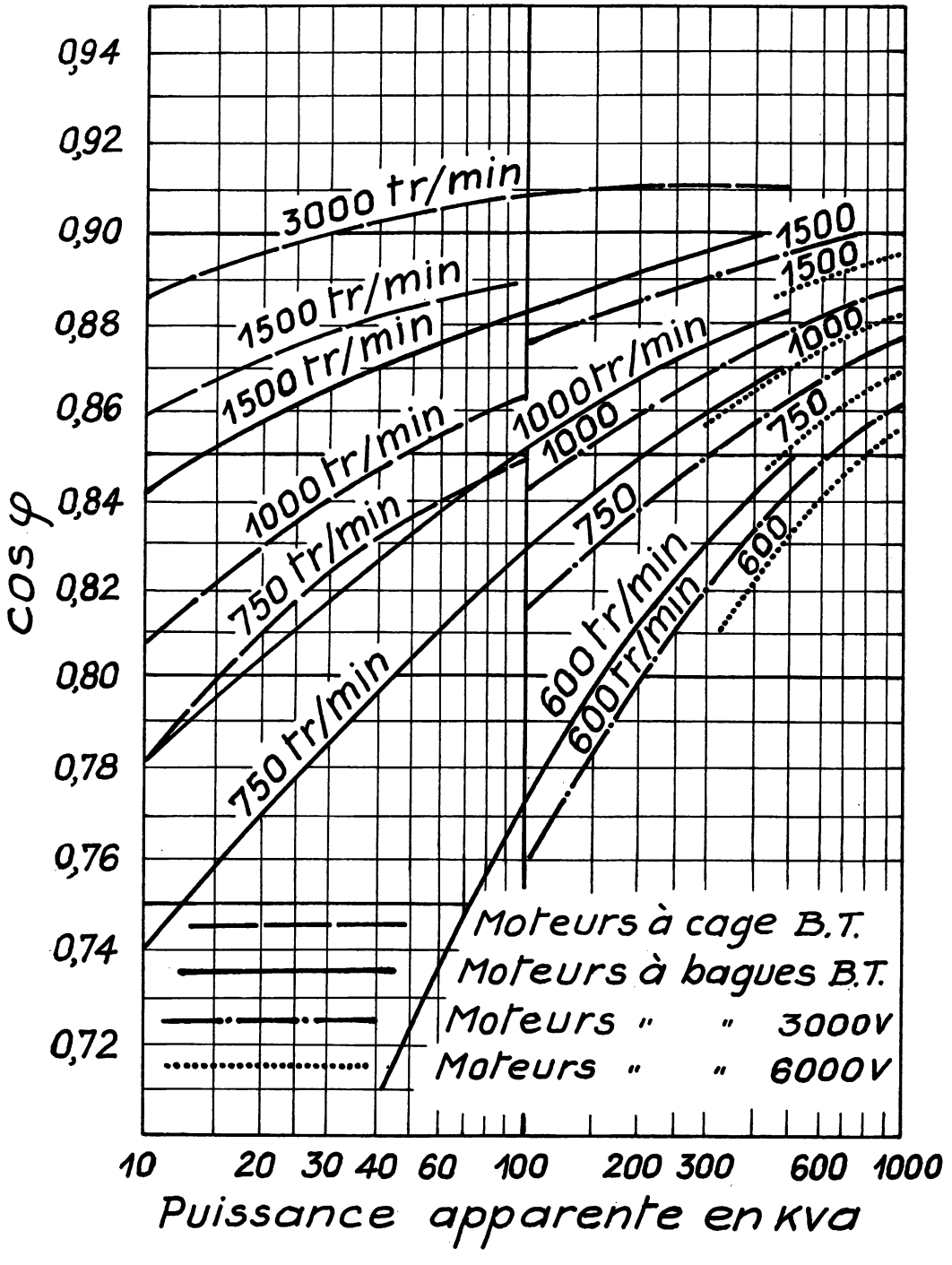

Moteurs à bagues —— Moteurs à cage ——
Rendement en o/o
94
92
90
88
86
84
82
80
78
76
74
72
1500 tr/min
1000 tr/min
750 tr/min
600 tr/min
1500 tr/min
1000 tr/min
750 tr/min
600 tr/min
94
93
92
91
90
89
88
87
3000V
6000V
1500 tr/min
1000 tr/min
750 tr/min
600 tr/min
1500
1000
750
600
10 20 30 40 60 100 200 300 600 1000
Puissance apparente en kva

Tableau 27


0,94
0,92
0,90
0,88
0,86
0,84
0,82
0,80
0,78
0,76
0,74
0,72
cos φ
3000 tr/min
1500 tr/min
1500 tr/min
1000 tr/min
750 tr/min
750 tr/min
1500
1500
1000 tr/min
1000
1000
750
750
600 tr/min
600 tr/min
600
Moteurs à cage B.T.
Moteurs à bagues B.T.
Moteurs " " 3000V
Moteurs " " 6000V
10
20
30
40
60
100
200
300
600
1000
Puissance apparente en kva

ractéristique pour un moteur d'une puissance et d'une vitesse données. Par précaution, on peut très bien prendre les valeurs les plus basses.

Par exemple :
Pour le rendement de 92% et cosφ - 0,89 prendre r_d = 91% et cosφ - 0,88 ou même les valeurs encore plus basses.

Pour la facilité d'emploi des courbes on les a tracées en fonction des puissances apparentes W_{app} et non pas en fonction des puissances utiles:

$$W_{app} = \frac{\sqrt{3}\ U\ I_1}{1000}\ kVA \qquad (30)$$

Exemple :
La section du conducteur d'un enroulement statorique d'un moteur à quatres pôles est s_c = 3,52 mm^2. La tension d'alimentation est de 380 V, le moteur est couplé en étoile.
On demande de définir la puissance approximative de ce moteur, sa construction étant du type ouvert et ventilé, le diamètre d'alésage 15,2 cm et le nombre des encoches N_1 - 36 avec c_e - 22 conducteurs par encoche.

Suivant le tableau 21, la densité de courant recommandée pour ce type de moteur et pour la puissance de 7 à 9 *kW* est δ_c = 4,5 A/mm^2. Donc on peut admettre pour la courant statorique la valeur de I_1 - 4,5 × 3,52 - 15,8 ampères, ce qui donne la charge linéaire admissible de :

$$AC = \frac{N_1 \times c_e \times I_1}{D_a \times \pi \times x} = \frac{36 \times 22 \times 15,8}{15,2 \times \pi \times 1} = 262\ A/cm$$

D'autre part, la puissance apparente est :

$$W_{app} = \frac{\sqrt{3}\ U\ I_1}{1000} = \frac{\sqrt{3} \times 380 \times 15,8}{1000} = 10,4\ kVA$$

D'après les courbes du tableau 24 pour les moteurs à quatre pôles, on a le rendement = 86% et suivant le tableau 25 on a cosφ - 0,86.
A titre de précaution faisons baisser le rendement de 2 points et le cosφ d'un point.

Donc la puissance utile cherchée est :

$$W_u = \frac{\sqrt{3} \times 380 \times 15,8 \times 0,84 \times 0,85}{1000} = 7,43\ kW$$

Lorsqu'un moteur a gardé sa plaque signalétique d'origine, les caractéristiques y indiquées peuvent servir au contrôle de la puissance, lors d'un rebobinage. Cela est possible pour reconstituer l'enroulement ancien ou l'enroulement modifié, par exemple, lors d'un rebobinage pour une autre polarité.

On peut dire avec une approximation suffisante que lors du changement de la vitesse de rotation de moteurs de petite et de moyenne puissance, leur puissance nominale varie directement comme la vitesse de rotation, à l'exception des cas de rebobinage d'un moteur à grande polarité en moteur à deux pôles. En particulier, la puissance d'un moteur à quatre pôles rebobiné pour deux pôles ne se double pas, comme on pourrait s'y attendre, mais augmente tout au plus de 30 à 50%, suite à la distribution inadéquate des inductions dans la couronne et dans la denture du circuit magnétique.

Cependant, même dans le cas d'un rebobinage simple d'après les données primitives, on ne doit pas compter sur la restitution complète de la puissance nominale primitive. Cela est vrai en particulier, dans le cas où on ne dispose plus de traces de l'ancien enroulement ou dans le cas de doute sur l'origine même de l'enroulement. Ce dernier pourrait déjà avoir subi une modification peu heureuse des données primitives par un bricoleur quelconque. Or, d'une part, les moteurs modernes sont très poussés, surtout ceux de puissance relativement faible. Les calculs minutieux et les recherches ont permis de pousser leurs caractéristiques magnétiques et électriques.

Il y a des cas où on ne dispose d'aucune indication quant à la puissance d'un moteur étranger. Le cas peut se présenter lors de l'achat d'un moteur d'occasion démuni de son enroulement statorique et ne portant pas de plaque signalétique. La puissance en *kW* de ce moteur peut être estimée avec une certaine approximation par la formule :

$$W_u = 1{,}82 \times D_a^2 \times L_f \times N$$

D_a et L_f étant respectivement le diamètre du rotor et la longueur du paquet de tôles du circuit magnétique exprimés tous les deux en mètres.

Lorsqu'on est obligé de rebobiner un moteur, primitivement étudié et construit pour conducteur en cuivre, en moteur avec

conducteur en aluminium, on constate qu'il y a lieu de réduire la puissance de ce moteur. Le rapport des résistances de deux enroulements identiques bobinés, l'un en cuivre rouge, l'autre en aluminium, est égal à celui des résistivités, c.à.d. :

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{2,08}{3,44} = 0,6035$$

Comme les pertes électriques sont proportionnelles à $I^2 \times r$, pour obtenir des pertes dans les enroulements d'un moteur bobiné en aluminium, égales à celles du moteur identique bobiné en cuivre rouge, l'intensité du premier ne devra être que $\sqrt{0,6035} = 0,778$ de celle du deuxième.

D'autre part, comme les puissances sont à peu près proportionnelles aux intensités, toutes choses égales d'ailleurs et, finalement, la puissance du moteur bobiné en aluminium sera 0,777 fois celle du moteur bobiné en cuivre rouge. Par exemple, la puissance d'un moteur de 20 *kW* avec le conducteur en cuivre devient de $20 \times 0,778 = 15,5$ *kW* avec le conducteur en aluminium.

Généralement, dans ce cas, le cosφ tombe de 2 à 3 points, le rendement aussi, le glissement augmente de 30 à 40%.

Même les grands constructeurs admettent un échauffement de l'enroulement en aluminium un peu plus élevé et diminuent un peu le nombre de spires en série par phase du stator, le rotor n'étant pas modifié, d'où accroissement correspondant de la section des fils du stator et également accroissement de la puissance du stator. Si W_1 et W_2 sont les puissances, correspondant respectivement aux nombres de spires en série par phase n_1 et n'_1 pour établir l'équilibre des pertes dans le fer et les enroulements, cette réduction se fera dans le rapport :

$$\frac{n'_1}{n_1} = \sqrt{\frac{W_1}{W_2}}$$

Par exemple :

$$\text{pour } \frac{W_1}{W_2} = \frac{0,778}{0,87}, \text{ on a } \frac{n'_1}{n_1} = \sqrt{\frac{0,778}{0,87}} \approx 0,95$$

soit une réduction du nombre de spires de 5%. Le coefficient de

réduction de la puissance de 0,778 peut être aussi relevé à 0,85 et même à 0,88. De plus, le facteur de puissance à pleine charge peut être ainsi légèrement amélioré. En résumé, on conçoit que, le remplacement du cuivre rouge par l'aluminium, ne réduit la puissance des moteurs que de 12 à 15%.

D'autre part, l'expérience montre que lorsqu'on modifie un moteur avec enroulement en cuivre en un moteur avec enroulement en aluminium, il est justifié de passer d'un enroulement imbriqué à deux sections par encoche, à un enroulement concentrique. Et en effet, le passage d'un enroulement imbriqué en un enroulement concentrique permet de diminuer la section de l'encoche, par contre le passage du conducteur en cuivre à un conducteur en aluminium, exige l'augmentation de la section d'encoche. D'ailleurs, il est plus indiqué d'augmenter le flux que de le diminuer lors de cette modification. De toute façon, il y a lieu de compléter l'étude de la modification par un contrôle de la possibilité de loger les têtes du nouvel enroulement entre le circuit magnétique et les paliers.

Lorsqu'un moteur subit une modification, par exemple, suite à la marche au dessus de 220 V, ou suite à la modification de régime, ou même suite à la modification d'un moteur ouvert et ventilé en un moteur entièrement fermé, on est obligé de changer sa puissance, donc de changer aussi ses inductions normales pour conserver un bon fonctionnement. Quel est, dans ce cas, le nombre de conducteurs par encoche à adopter ?

Si le nombre de conducteurs primitif est c'_e, le nombre de conducteurs à prévoir c''_e est donné par la formule :

$$c''_e = \frac{c'_e}{0{,}21 + 0{,}79\sqrt{\frac{W_2}{W_1}}}$$

où W_1 est la puissance primitive et W_2 la nouvelle puissance. En cas de modification de la fréquence en même temps, c''_e est donné par la formule :

$$c''_e = \frac{c'_e}{0{,}21 + 0{,}79\sqrt{\frac{W_2}{W_1} \times \frac{f_1}{f'_1}}}$$

où f_1 est la fréquence primitive et f'_1 est la nouvelle fréquence.

Le nombre ainsi trouvé ne peut servir qu'à titre d'indication pour éviter les erreurs grossières. Dans tous les cas, on devra comparer l'enroulement ainsi déterminé à celui d'un moteur de base complètement essayé.

Des cas de modification d'un enroulement pour une puissance déclassée soit due au genre de protection et de ventilation, soit due au régime de fonctionnement, peuvent se présenter souvent. Les tableaux ci-joints donnent les valeurs approximatives de la puissance des moteurs pour une même dimension du circuit magnétique actif, par rapport aux différents types de protection (tableau 28) et de régime (tableau 29).

Tableau 28

Vitesse synchrone tr/min	Rapport de puissance par rapport au type ouvert	Abrité - Ventilé		Fermé - Ventilé		Entièrement fermé	
		jusqu'à 100 kW	de 100 kW à 1000 kW	jusqu'à 100 kW	de 100 kW à 1000 kW	jusqu'à 3 kW	de 3 kW à 50 kW
3000	1	1	0,9	0,85	0,85	0,4	—
1500	1	1	0,9	0,85	0,80	0,4	0,25
1000	1	1	0,85	0,85	0,75	0,45	0,30
750	1	0,95	0,85	0,80	0,75	0,5	0,45
500 et moins	1	0,95	0,80	0,80	0,70	0,5	0,45

Bien entendu, les valeurs définitives dans chaque cas particulier doivent être confirmées par les essais en plate-forme.

Il peut se présenter un cas où l'on demande de changer les caractéristiques d'un moteur.

Généralement, il y a lieu de faire un compromis entre le couple du moteur et son cosφ. Si le moteur à modifier a un bon cosφ ,

Tableau 29

Rapport de puissance par rapport au type normal	REGIME	OBSERVATIONS
1	Régime continu normal	—
0,9	Régime temporaire de 60 min.	Régime de courte durée, suivi d'une pause assez longue pour que le moteur puisse revenir à la température ambiante (35° C). Utilisation : machines-outils.
0,8	Régime temporaire de 30 min.	
0,67	Régime temporaire de 15 min.	
0,9	Régime intermittent avec le facteur de marche de 60%	Cycle de 10 min. max. Soit 6min. de marche et 4min. d'arrêt Soit 2min. de marche et 8min. d'arrêt Soit 1min. de marche et 9min. d'arrêt Utilisation : levage
0,7	Régime intermittent avec le facteur de marche de 20%	
0,67	Régime intermittent avec le facteur de marche de 10%	
0,9	Régime continu à charge intermittente avec durée de marche en charge de 80%	Cycle de 10 min. max.
0,74	Régime continu à charge intermittente avec durée de marche en charge de 40%	

on peut se permettre de saturer le moteur en diminuant le nombre de conducteurs par encoche et ainsi augmenter le couple. De toute façon, il faut toujours contrôler son $AC \times \delta_c$

Une réduction du courant de démarrage peut être obtenue, si cela est exigé lors de la modification, en augmentant le nombre de spires en série par phase. Dans ce cas, le couple maximum primitif doit être assez grand pour permettre une baisse acceptable. Il y a lieu de faire un compromis entre les deux valeurs. Une expérience de longue date n'est pas nécessaire pour arriver à une solution acceptable.

Il a été mentionné précédemment que les recherches récentes ont permis de pousser les caractéristiques des moteurs modernes.

D'autre part, l'exécution technologique en grande série, surtout en ce qui concerne les isolants et l'imprégnation, a permis d'atteindre une perfection qu'il est difficile de réaliser dans un atelier de réparation.

On a souvent l'impression que la puissance indiquée sur la plaque signalétique ne pourra pas être réalisée. Et en effet, il est très difficile lors d'un calcul rapide et sommaire, de tomber du premier coup sur l'idée-clef qui a servi de base au calcul d'une série de moteurs poussés.

Et ce n'est pas tout, parce que même les moteurs rebobinés suivant une spécification primitive, c.à.d. avec rigoureusement le même nombre de spires et la même section de conducteurs, ne donnent pas toujours toute la puissance indiquée sur la plaque signalétique. On le constate souvent lors de l'essai d'échauffement et la cause réside dans l'emploi d'un isolant non adéquat et surtout dans l'absence d'une parfaite imprégnation.

Evidemment, on peut incriminer la modification de construction, par exemple : un ventilateur qui ne convient pas, ou canaux de ventilation bouchés, mais cela est une autre question.

Pourtant la technique moderne dispose de moyens pour relever la puissance. Dans bien des cas, on demande au réparateur de rebobiner un moteur, soit de façon à obtenir une puissance accrue avec le même échauffement ou avec un échauffement plus élevé, soit de le munir d'un enroulement pouvant supporter, en service intermittent, des températures plus élevées avec les matériaux résistant à ces températures.

En règle générale, on peut augmenter la puissance de 5% pour chaque augmentation de 10% de la section de cuivre, sans changer pour cela la classe d'isolement.

D'autre part, le passage de l'isolement de la classe *A* à la classe *B*, permet d'augmenter la puissance de 7,5%.

Finalement, le passage d'un enroulement de la classe *B* à un enroulement au silicone, ou traité au silicone, produirait une

autre augmentation de 10% de la puissance, puisqu'on peut atteindre un échauffement de 40° C plus élevé qu'en classe B.

L'isolement au silicone ou silicone et amiante, permet l'emploi des bobinages à une température maximum absolue de 175° C et 180° C, avec échauffement de 120° C, surtout pour des puissances inférieures à 1 kW, de sorte que si la température ambiante est de 40° C, l'échauffement est de 120° C, on a la température maximum de 160° C et pour les points les plus chauds encore 15° C, donc 160° C + 15° C = 175° C.

La tendance actuelle aboutit à l'emploi de fil émaillé dont l'émail est une résine synthétique du type acétate de polyvinyle. Ces fils comportent respectivement deux, trois et même quatre couches d'émail. Le fil à double couche d'émail synthétique peut remplacer le fil émaillé et guipé au coton, à simple couche de soie et d'émail, à double couche de soie, à simple couche de papier et d'émail et à double couche de coton. Les dimensions plus faibles de la couche d'isolant de fil à acétate de polyvinyle ont pour conséquence la possibilité d'augmenter la puissance. Sa résistance mécanique et le pouvoir diélectrique élevés sont appropriés pour les rebobinages de moteurs dont le fil primitif comporte une double couche de coton, ou une couche de soie, ou encore si ce fil primitif est à simple couche de coton et émaillé ou à simple couche de papier et émaillé. Le fil renforcé par quatre couches d'émail, en raison de ses propriétés mécaniques et diélectriques très élevées, peut être employé pour des enroulements à 600 volts pour éviter des remplissages de séparation dans les encoches et des isolements entre bobines.

La majorité des enroulements de la classe B sont maintenant réalisés avec du fil isolé à deux couches de soie de verre, ce qui est supérieur au point de vue de la résistance mécanique et des propriétés diélectriques au fil isolé à l'amiante précédemment employé. Le fil à double couche de soie de verre peut aussi comporter un émail (acétate de polyvinyle) sous la couche de soie de verre.

Les fils isolés avec une ou deux couches de soie de verre traités au vernis de silicone, conservent leurs propriétés mécaniques et diélectriques à des températures plus élevées qu'il est toléré pour les enroulements de la classe B. On peut prévoir un développement considérable de l'emploi de cet isolement en vue d'augmenter la puissance des moteurs rebobinés.

Chapitre 17

MOTEURS A DOUBLE POLARITE

Lorsque la fréquence de courant d'alimentation reste constante, la vitesse d'un moteur asynchrone est définie par le nombre de pôles de son enroulement statorique(et rotorique dans le cas d'un moteur à bagues). Elle en dépend très peu de la charge, parce que le glissement en service normal est très faible.

Pourtant, on exige souvent qu'on puisse avoir la possibilité de modifier la vitesse de rotation d'un moteur.

Dans la plupart des cas, on se contente de la modification par à coup de l'une à l'autre vitesse.

Telle modification peut être réalisée en prévoyant un enroulement statorique spécial (et rotorique en cas de moteur à bagues), permettant de modifier le nombre de pôles par simple réarrangement du couplage de ses divers circuits.

Il existe des enroulements permettant de réaliser trois et même quatre vitesses différentes. Toutefois, seulement l'application des moteurs à double polarité a pris un développement pratique. Généralement, ces polarités sont dans le rapport de 1 à 2.

On appelle de tels enroulements, des "enroulements à double vitesse". Plus un enroulement a de polarités, plus il doit avoir de sorties pour réaliser les couplages nécessaires et d'autant plus que le dispositif de manoeuvre est compliqué.

Ci-après on ne considérerait que les enroulements avec le nombre minimum de 6 sorties, dont les applications connues sous le nom de "couplage Dahlander" sont nombreuses.

La caractéristique des enroulements de ce genre réside dans le fait que chaque phase est sous-divisée en deux circuits. Dans une de ces branches le sens du champ est le même pour les deux polarités et dans l'autre branche le sens de champ change lorsqu'on passe de l'une à l'autre polarité.

La fig. 65 représente une phase d'un enroulement concentrique

à une section par encoche. On remarquera que le sens du courant dans les sections de deux circuits, depuis l'entrée jusqu'à la sortie d'une phase est le même; dans ce cas, dans le sens des aiguilles d'une montre.

Le même enroulement est représenté sur la fig. 66 mais couplé pour deux pôles, au lieu de quatre. Le sens du courant des sections du groupe 1 - 2 est resté le même tandis que celui du groupe 3 - 4 est inversé, c.à.d. devient contraire aux aiguilles d'une montre.

Le nombre des encoches par pôle et par phase est doublé, c.à.d. devient 6 au lieu de 3. D'autre part, les encoches occupées par les conducteurs de même phase et avec le même sens de courant, ne se trouvent pas toutes les unes à côté des autres, mais sont espacées de 6 encoches. Cette disposition ne constitue pas un obstacle au bon fonctionnement de l'enroulement, mais rabaisse toutefois sa caractéristique magnétique à petite polarité, en exigeant les coefficients de bobinage plus petits.

Pour que le changement du couplage de la fig. 65 au couplage de la fig. 66 soit possible sur la planchette à bornes, on doit sortir au moins trois bornes de chaque phase : points 2, 3 et 4, par exemple. Cela fait neuf sorties en tout, ce qui est contraire à la condition imposée demandant un plus petit nombre de bornes à réaliser.

Pour parer à cet inconvénient, on peut réaliser le changement du sens de courant dans les sections 3 - 4 d'une autre façon. Il suffit de connecter les points 1 et 4 et de transférer la fin de la phase V_1 du point 4 à la connection 2 - 3 comme l'indique la fig. 67. Dans ce cas, il suffit de faire sortir sur la planchette à bornes les points 2 (ou 3) et 4, c.à.d. deux par phase ou six par moteur, comme cela a été imposé.

Lorsque le nombre de paires de pôles, donc aussi le nombre de groupes de sections dans chaque phase est supérieur à deux (4 ou 6 par exemple), les groupes dont le sens de courant ne change pas, doivent alterner avec des groupes dont le sens de courant change (fig. 68 a et b).

On aperçoit que chaque moitié d'une phase est constituée des groupes d'un même étage. En outre, les groupes de sections de

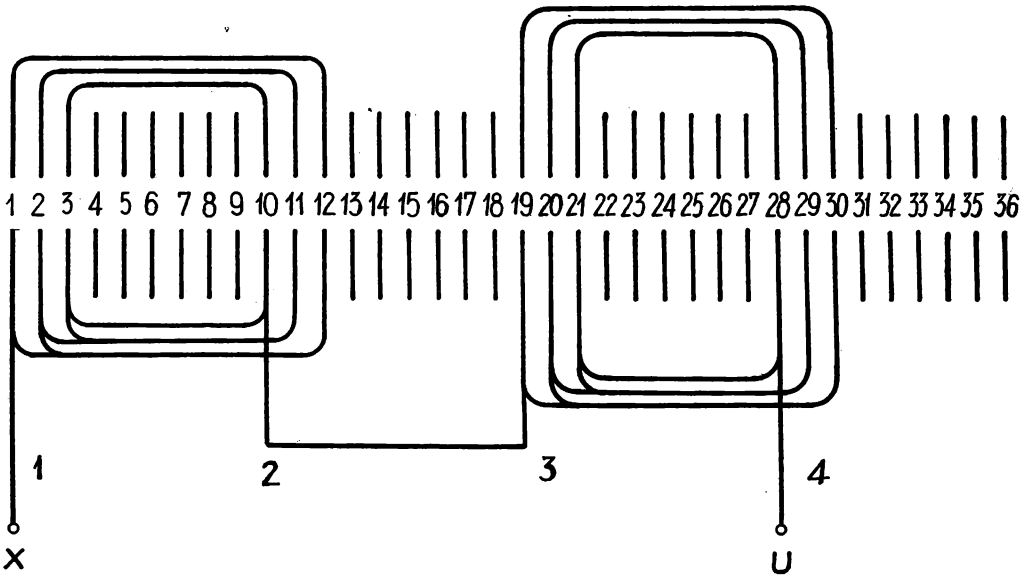


Fig. 65 – Une phase d'un enroulement concentrique : groupes de sections connectés en série pour 4 pôles.

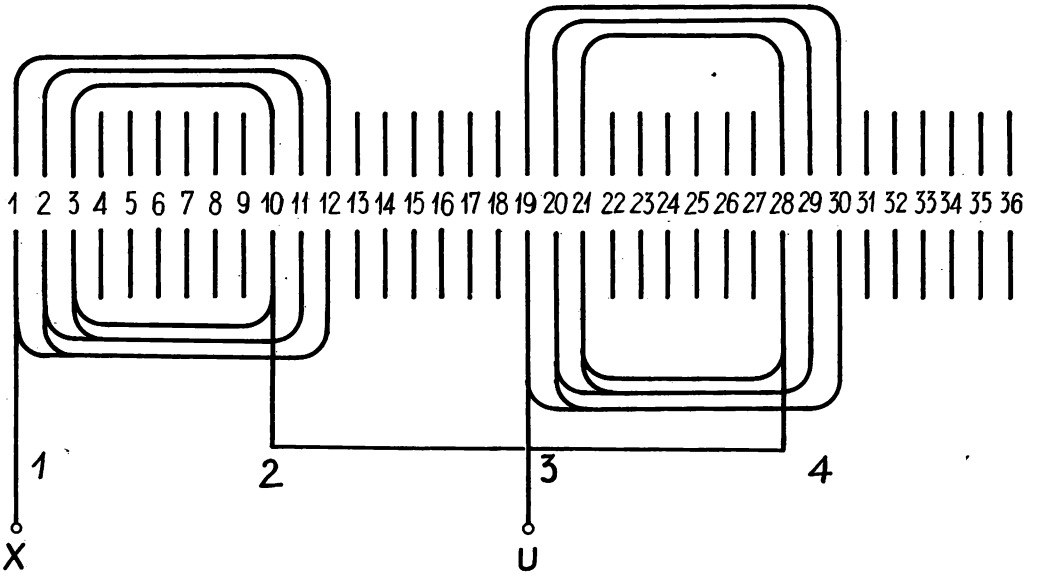


Fig. 66 – Une phase d'un enroulement concentrique : groupes de sections connectés en série pour 2 pôles.

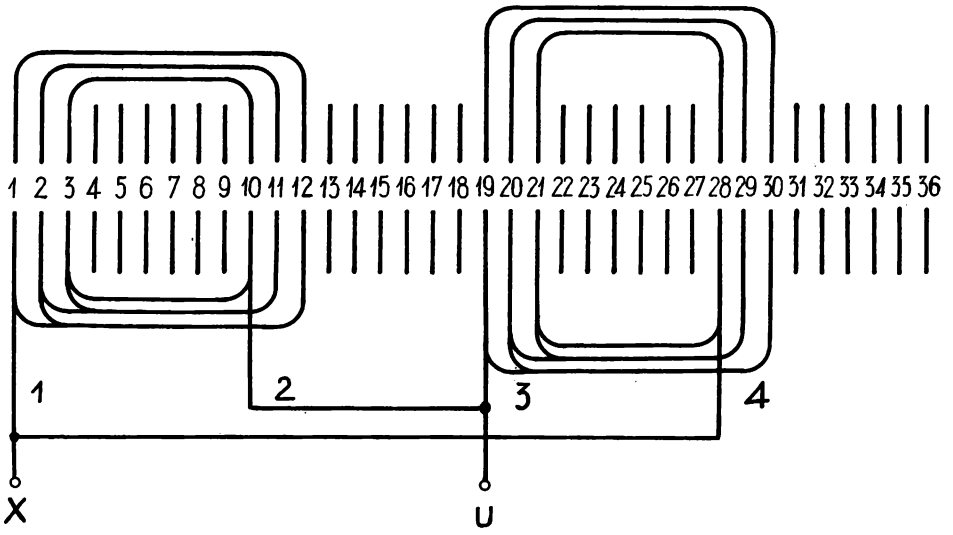


Fig. 67 – Une phase d'un enroulement concentrique : groupes de sections connectés en parallèle pour 2 pôles.

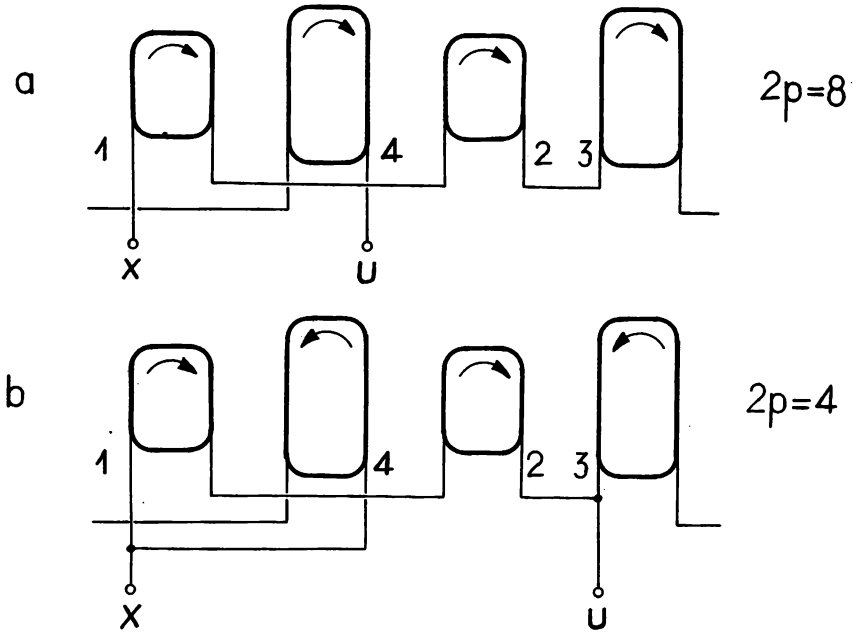


Fig. 68 – Schéma de principe de couplage d'un enroulement à deux vitesses dont la grande polarité est au moins 8.
a : grande polarité. b : petite polarité.

chaque moitié d'une phase peuvent être couplés en parallèle, comme en série. Ainsi, tout enroulement concentrique à une section par encoche avec nombre pair de pôles, peut être facilement couplé pour la moitié de pôles, toutefois à condition que ses connexions soient réalisées conformément à la fig. 68.

Ce problème se présente sous un autre aspect dans les enroulements à deux sections par encoche.

La fig. 69 représente une phase d'un enroulement imbriqué quadripolaire, à deux sections par encoche et à un pas entier. Le nombre de groupes de sections est égal au nombre de pôles et ils sont connectés en sorte, qu'en parcourant la phase de l'entrée à la sortie, on forme les pôles alternés. C'est pourquoi il n'est pas possible de diviser cette phase de sorte que dans une moitié on puisse changer le sens de champ, donc le nombre de pôles. Ainsi on est obligé de recourir à un autre arrangement de l'enroulement dont le type est donné par la fig. 70. Cet enroulement est aussi à un pas entier comme celui de la fig. 69, mais le nombre de groupes de sections est égal au nombre de paires de pôles comme dans l'enroulement concentrique à une section par encoche de la fig. 65. Comme ce dernier, on peut modifier lc couplage de l'enroulement, de la fig. 70 pour la moitié du nombre de pôles suivant la fig.

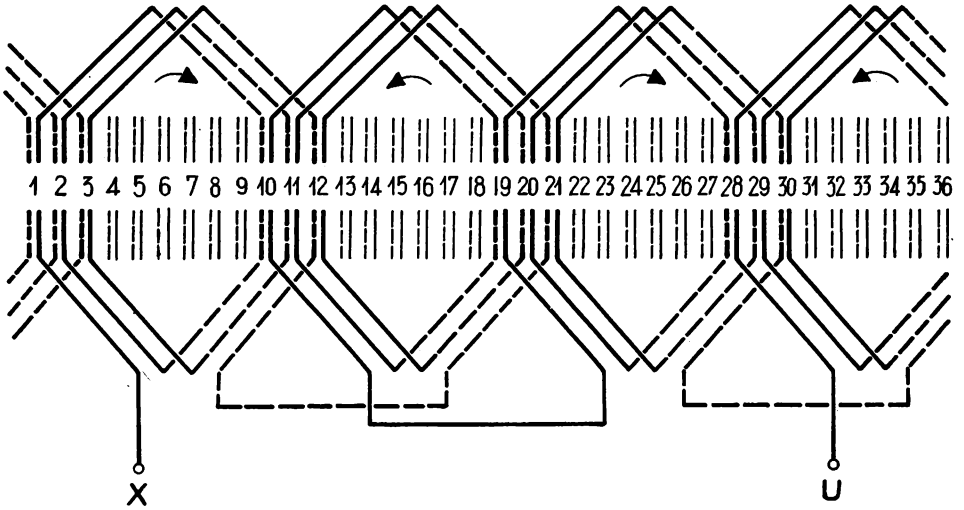


Fig. 69 – Une des phases d'un enroulement imbriqué à deux sections par encoche, à quatre pôles et à pas entier.

La fig. 72 donne le schéma pour des enroulements à deux vitesses et six bornes. A grande polarité les phases sont couplées en

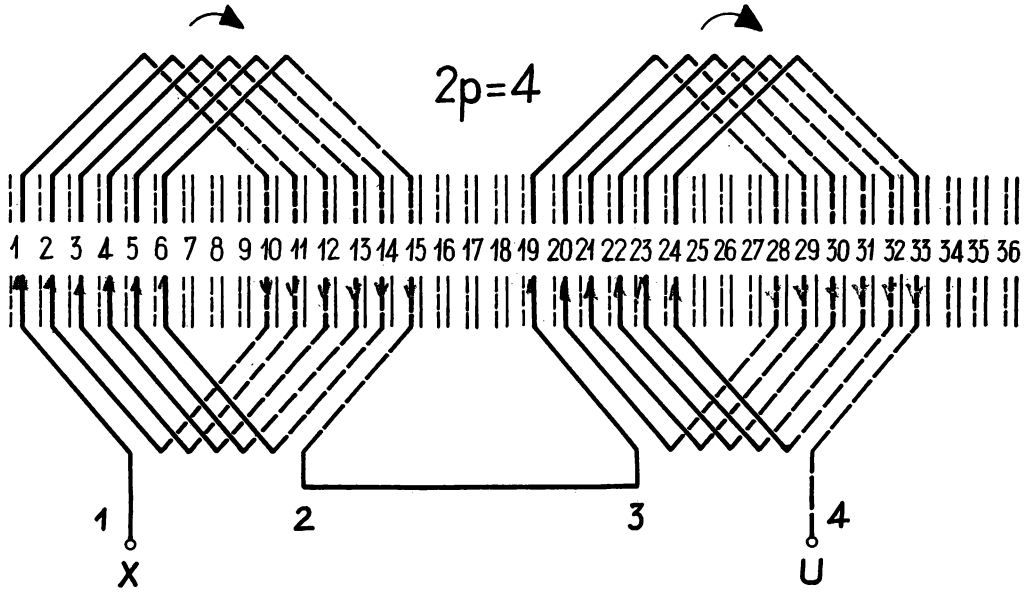


Fig. 70 – Une phase d'un enroulement imbriqué connecté pour 4 pôles.

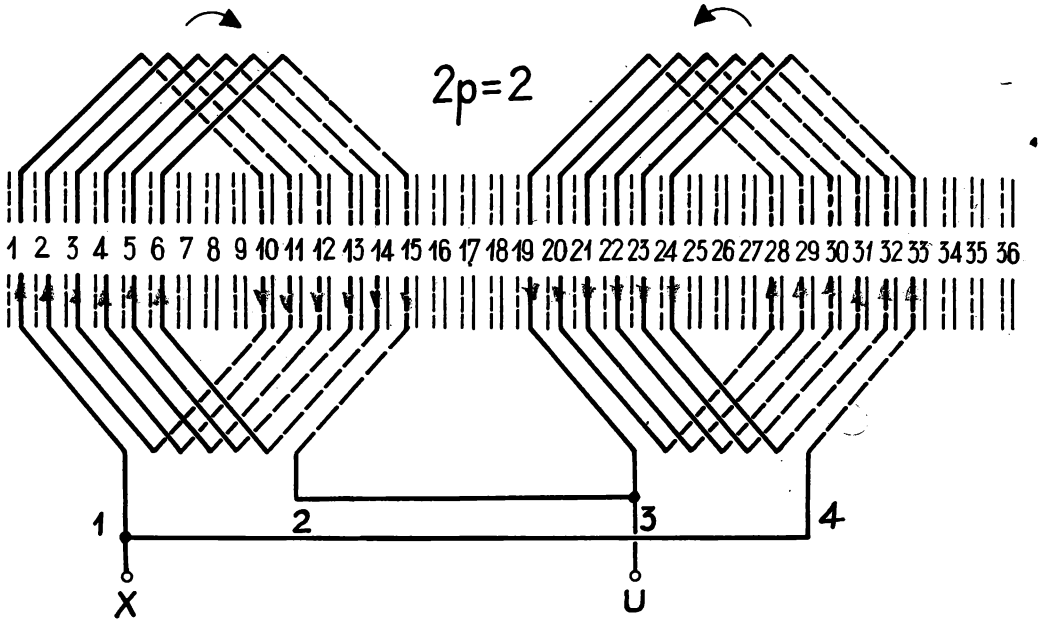


Fig. 71 – Une phase d'un enroulement imbriqué connecté pour 2 pôles.

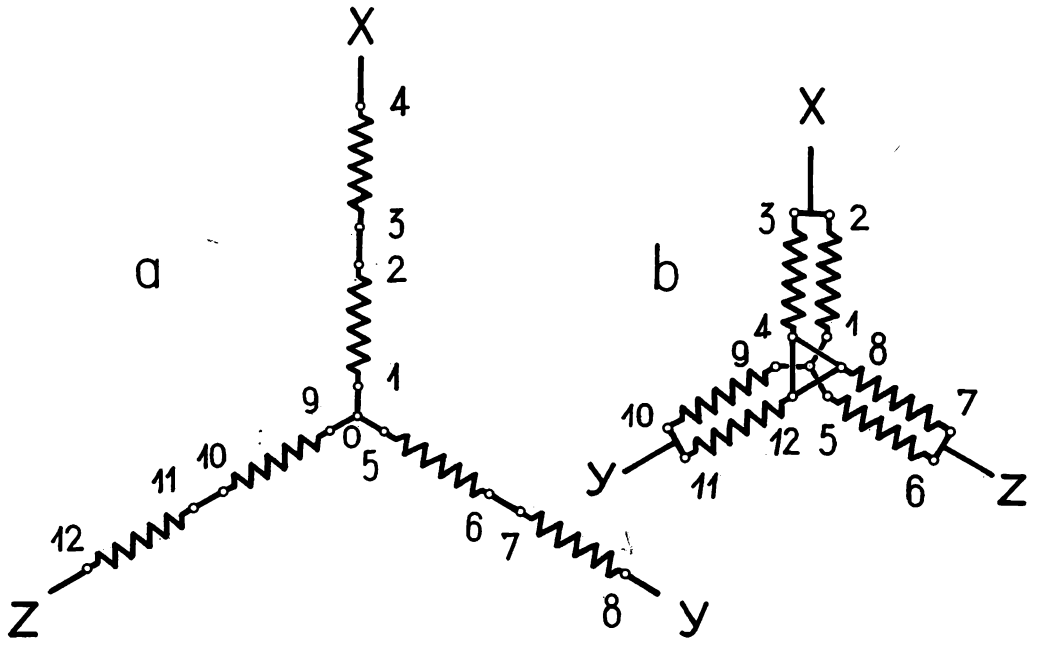


Fig. 72. - Enroulement à deux vitesses.
a-couplage : étoile-série pour grande polarité.
b-couplage : étoile-parallèle pour petite polarité.

étoile et le changement du nombre de pôles est réalisé en appliquant la tension au milieu de chaque phase (points 2 - 3, 6 - 7 et 10 - 11) au lieu d'appliquer aux bouts des phases (points 4, 8 et 12). En même temps, on court-circuite les bouts devenus libres, ce qui forme le deuxième point neutre. On a pour la petite polarité le couplage des phases en étoile avec deux circuits en parallèle.

La fig. 73 représente un autre schéma pour des enroulements à six bornes. Pour la grande polarité, ses phases sont couplées en triangle et le changement de polarité s'effectue en déplaçant la ligne d'alimentation des sommets de triangle (points 1-12; 4-5; 8-9) aux milieux de ces côtés (points 2-3; 6-7 et 10-11) avec un court-circuitage simultané des sommets par un point neutre. Ici, comme dans l'autre cas, le couplage de l'étoile avec deux circuits en parallèle correspond à la petite polarité.

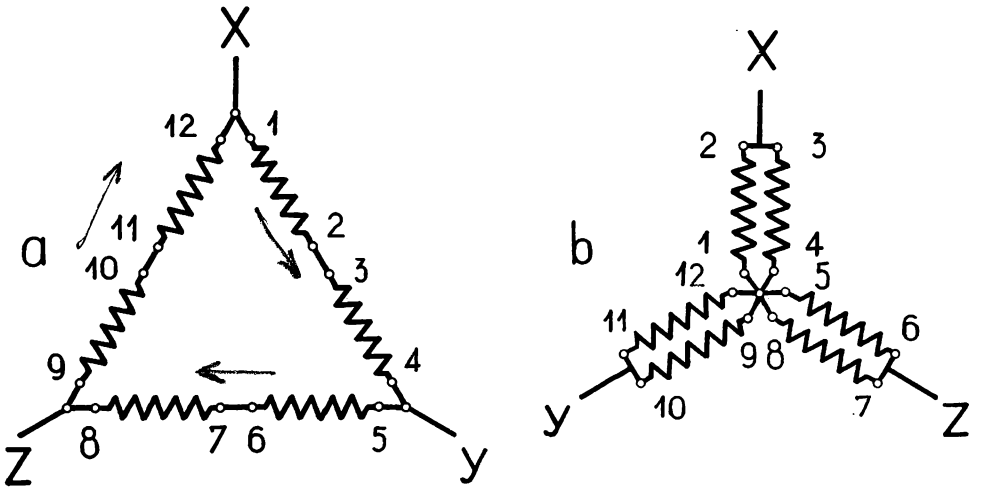


Fig. 73 - Enroulement à deux vitesses.
a- couplage : triangle-série pour grande polarité.
b- couplage : étoile-parallèle pour petite polarité.

Dans les deux cas, il ne faut pas perdre de vue qu'en passant de l'une des polarités à l'autre, les connexions entre deux phases et la ligne doivent être inversées pour conserver le même sens de rotation du moteur.

Le schéma d'un inverseur répondant à cette condition est donné sur la fig. 74.

Il y a lieu de noter une différence fondamentale entre les enroulements de la fig. 72 et ceux de la fig. 73.

Dans le premier cas, en passant de la grande polarité à la petite, le nombre de spires en série par phase n_1 devient deux fois plus petit, cependant que la tension par phase est restée la même.

De la formule (21):

$$\Phi \times f_1 = \frac{0{,}97\ U \times 10^8}{f \times n_1}$$

on déduit que, si le nombre de spires n_1 est diminué de moitié, la valeur du produit du flux par le coefficient de bobinage doit être doublée pour autant que toutes les autres valeurs de la formule restent invariables.

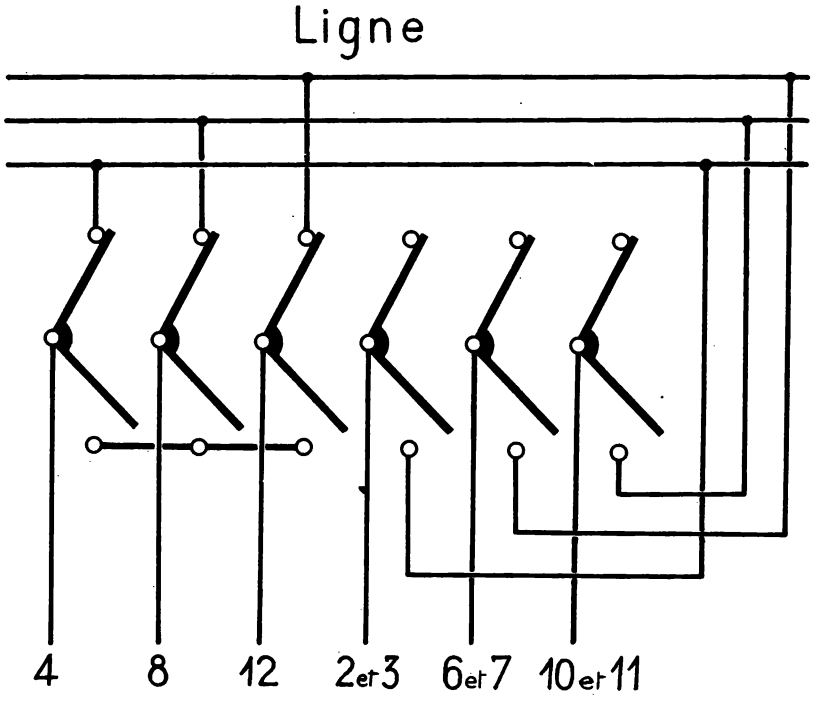


Fig. 74 – Commutateur pour les schémas *des fig. 73 et 72*

D'autre part, la formule (14):

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \times B_m \times \tau \times L_f$$

montre que, en passant de la grande à la petite polarité, l'arc

polaire τ devient deux fois plus grand et comme la longueur de fer L_f reste immuable, il s'en suit que, pour conserver la même valeur de l'induction B_m, le flux Φ doit être doublé.

On peut conclure que, si le coefficient de bobinage f_1 avait pû être conservé, le moteur aurait à toutes les deux polarités les mêmes valeurs de l'induction B_m dans l'entrefer.

Comme une section de dents calculée augmente avec l'arc polaire, les inductions dans les dents statoriques et rotoriques conserveraient leurs valeurs. Par contre, les inductions dans les couronnes statoriques et rotoriques seraient deux fois plus grandes pour la petite polarité, pour autant que les sections de couronnes restent les mêmes.

En réalité, le coefficient de bobinage a des valeurs différentes suivant la polarité, donc les valeurs d'induction dans l'entrefer et dans les dents changent inversement proportionnel aux coefficients de bobinage. D'une façon générale, la valeur de coefficient de bobinage à petite polarité est inférieure à celle de grande polarité, d'où l'augmentation des inductions dans l'entrefer et les dents.

Il en est tout autrement dans le cas du schéma de la fig. 73. Ici le nombre de spires en série par phase est aussi réduit à la moitié, en passant de la grande à la petite polarité; toutefois, la tension par phase ne se maintient pas, suite au changement du couplage de phases.

Si à la grande polarité et avec le couplage en triangle, la tension par phase est égale à la tension en ligne, à la petite polarité et avec le couplage en étoile, la tension par phase devient $\sqrt{3}$ fois plus petite.

Donc, toute chose égale d'ailleurs, avec les mêmes coefficients de bobinages, les inductions dans l'entrefer et dans les dents doivent baisser dans la même proportion. Par contre, les inductions dans les couronnes statoriques et rotoriques doivent augmenter dans le rapport $2/\sqrt{3}$ - 1,154 c.à.d. seulement de 15,4 %.

La différence ci-dessus entre les schémas de la fig. 72 et de la fig. 73 donne l'indication directe quant à leur choix.

Si le calcul des inductions dans les couronnes statoriques et rotoriques donne des chiffres suffisamment bas pour que leurs valeurs doublées soient encore acceptables, en passant à petite polarité, on donne la préférence au schéma de la fig. 72.

Alors la section doublée de chaque phase permet de doubler le courant absorbé de la machine, même si on conserve la densité primitive de courant. Généralement, cette dernière peut être augmentée suite à une meilleure ventilation à plus grande vitesse . D'autre part, la puissance apparente étant doublée les valeurs du rendement et du cosφ augmentent sensiblement. D'où il s'en suit que la puissance nominale à petite polarité peut être prise plus que le double de celle à grande polarité. Ainsi le coefficient d'utilisation à deux polarités devient approximativement le même. L'affaire se présente tout autrement dans le cas, où l'induction dans la couronne du stator devient trop importante pour qu'on puisse l'accepter pour petite polarité. C'est alors qu'on est obligé de faire appel au schéma de la fig. 73.

Ici la section totale de conducteurs reste immuable, d'autre part, la différence entre les valeurs de flux du triangle et de l'étoile avec deux circuits en parallèle est faible. Donc le courant absorbé ainsi que la puissance du moteur restent dans le même ordre de grandeur à deux polarités.

Ce cas est particulièrement caractéristique pour les moteurs à deux polarités, dont la petite puissance est $2p = 2$, pour autant qu'on n'a pas à faire à un moteur prévu primitivement pour deux pôles avec très large couronne statorique. On a eu un exemple frappant de ce cas au chapitre 9 où on a étudié en détail la distribution anormale des inductions dans diverses parties du circuit magnétique.

La conduite de calcul d'un moteur à deux polarités ne se distingue en rien du moteur ordinaire. On effectue le calcul pour une des polarités et puis on vérifie ce qui se passe à l'autre polarité.

Généralement, on conseille de commencer le calcul de base pour la petite polarité, quoique tel ordre n'est nullement obligatoire.

Les coefficients de bobinage des enroulements concentriques à une section par encoche, couplés pour la moitié du nombre de pôles, peuvent être obtenus en multipliant les coefficients pour le nombre donné d'encoches par pôle et par phase (voir tableaux 8 et 9) par 0,707. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue qu'à petite polarité, le nombre d'encoches par pôle et par phase est deux fois plus grand qu'à grande polarité.

Quant aux coefficients de bobinage des enroulements à deux sections par encoche, pour la petite polarité on peut les prendre tels quels du même tableau, suivant le pas employé avec un nombre donné des encoches par pôle et par phase, pour la grande polarité on les obtient en multipliant par 0,866 les valeurs prises du tableau pour le pas et le nombre d'encoches par pôle et par phase, correspondants à cette polarité.

Il est bon à noter que souvent on utilise pour les enroulements à deux polarités un pas, qui se présente allongé pour la grande polarité et raccourci pour la petite polarité. Cela est une nécessité impérieuse, sinon pour la petite polarité on obtient des valeurs tellement basses pour les coefficients de bobinage qu'on est amené à augmenter en conséquence le nombre de spires.

Généralement, dans ces cas, on utilise un pas tel qu'il soit, quatre fois plus grand que le nombre d'encoches par pôle et par phase pour la grande polarité et deux fois plus grand que le nombre d'encoches par pôle et par phase pour la petite polarité.

Soit : $y = 4\,q_1$ et $y = 2\,q_2$

où q_1 représente le nombre d'encoches par pôle et par phase de la grande polarité et q_2 de la petite polarité.

Exemple :

Déterminer les coefficients de bobinage pour l'enroulement à deux sections par encoche, ayant à grande polarité le nombre d'encoches par pôle et par phase $q_1 = 3$.

Si on prend pour la grande polarité le pas entier comme cela est représenté sur la fig. 70, le pas est : $y = 3q_1 = 9$

et le coefficient de bobinage est le produit de 0,866 par la valeur trouvée au tableau 8

pour $q_1 = 3$ et $y = 9$

$f_1 = 0{,}866 \times 0{,}96 = 0{,}831$

Pour la petite polarité, le coefficient de bobinage peut être pris dans le tableau pour $q_1 = 2 \times 3 = 6$ et $y = 9$

On a : $f_1 = 0,676$

Cela représente relativement un petit chiffre dont il est souhaitable d'augmenter la valeur en allongeant le pas.

Si on prend

$$y = 4\, q_1 = 4 \times 3 = 12$$

alors, pour la grande polarité on a :

$$f_1 = 0,866 \times 0,831 = 0,688$$

et pour la petite polarité on a :

$$f_1 = 0,828$$

L'enroulement rotorique d'un moteur à bagues peut être ainsi transformé en deux polarités. Dans ce cas, le rotor doit avoir au moins six bagues pour qu'il soit possible d'appliquer un schéma de la fig. 73 ou 72. Comme cela presente des difficultés considérables de construction, on n'applique que très rarement l'enroulement à double polarité aux moteurs à bagues.

Un enroulement triphasé ordinaire comportant un nombre entier d'encoches par pôle et par phase et établi pour p paires de pôles ne peut pas être transformé en un enroulement ayant $p/2$ paires de pôles.

L'enroulement de Dahlander à une section par encoche, ayant un nombre pair d'encoches par pôle et par phase peut être transformé dans le rapport de 1 à 2, mais, quand son montage correspond au nombre de pôles le plus grand, des harmoniques d'ordre pair se produisent.

Il a été mentionné plus haut que le nombre de polarités pour lequel on peut prévoir un enroulement, peut être supérieur à deux. Cependant, même à trois diverses polarités, il est difficile de calculer un moteur qui puisse fonctionner d'une façon satisfaisante sur toutes ses polarités. Même les gros constructeurs préfèrent dans ces cas, munir le stator de deux enroulements distincts, placés dans les mêmes encoches et chacun de ces enroulements étant à deux polarités. Un enroulement peut être prévu, par exemple, pour

2 et 4 pôles et l'autre pour 6 et 12. Il va de soi qu'un tel moteur est très mal utilisé étant donné qu'une partie d'encoche quelconque est toujours occupée par des conducteurs qui ne participent pas au moment donné, au fonctionnement du moteur.

Chapitre 18

RAPPORT D'ENCOCHES

On constate dans le fonctionnement des moteurs asynchrones à cage d'une conception défectueuse, une série d'anomalies, qui généralement rendent leur exploitation difficile et parfois même entravent tout à fait leur utilisation.

Les anomalies de ce genre sont :

1- Collage ou blocage à l'arrêt.
Le moteur, étant branché sur la ligne, ne démarre pas. Toutefois, une fois lancé au moyen d'un effort extérieur au moteur, celui-ci gagne de la vitesse et ultérieurement ne présente, plus aucune anomalie dans sa marche en charge.

2- Patinage.

Le moteur démarre normalement, mais manque d'arriver à la vitesse normale et s'accroche à une vitesse qui est généralement un septième de la vitesse nominale. Si pourtant, on amène la vitesse du rotor par un moyen quelconque externe au moteur, à une vitesse légèrement dépassant cette vitesse, le moteur continue à accélérer et se comporte ensuite normalement.

3- Bruit magnétique.

Le moteur produit, au cours du démarrage, un bruit aigu qui peut, soit disparaître lorsque la vitesse normale est atteinte, soit se transformer en un sifflement plus ou moins fort. On demande dans des cas spéciaux, suivant des exigences locales, une marche pratiquement silencieuse, mais d'une façon générale, ce bruit agit désagréablement sur l'ouïe et ne doit évidemment pas être toléré.

Toutes ces anomalies sont dues à des rapports inadéquats entre le nombre de pôles $2p$ et le nombre d'encoches statoriques et rotoriques N_1 et N_2.

Il n'est pas toujours possible d'éviter complètement ces anomalies même pour les grands constructeurs de machines électriques.

A plus forte raison, elles peuvent se présenter lors des rebobinages; par exemple, pour une autre polarité.

Il arrive qu'un rapport bien déterminé de nombre d'encoches N_1 et N_2 est presque toujours favorable à une polarité et défavorable à une autre polarité. Parfois on est amené à compléter un stator quelconque par un rotor dont seulement la longueur et le diamètre conviennent. Dans ce cas, la possibilité de tomber sur un rapport défavorable est particulièrement grande.

Une erreur de conception étant possible, on doit, lors d'un rebobinage ou lors d'une modification pour une nouvelle polarité, contrôler le rapport des nombres d'encoches du stator et du rotor.

A plus forte raison on doit effectuer ce contrôle lors du rebobinage d'un moteur à une vitesse pour un moteur à deux vitesses et surtout lors du calcul d'un moteur dont le nombre primitif de pôles est inconnu.

Tel contrôle peut être mené avec succès en appliquant les règles suivantes :

1.- En aucune circonstance, les nombres d'encoches statoriques et rotoriques ne doivent être ni égaux, ni multiples entre-eux, sinon on aura inévitablement à faire au blocage à l'arrêt. Etant donné que le rapport d'encoche n'est jamais plus grand que 2, on peut formuler cette règle comme ci-après :

$$N_1 \neq N_2$$
$$N_1 \neq 2N_2$$
$$N_1 \neq N_2/2$$

2.- Le nombre d'encoches rotoriques ne doit pas être multiple du nombre de pôles triplés, sinon, on aura aussi à faire au blocage à l'arrêt, bien que ce défaut ne sera pas aussi prononcé que dans le cas précédent.
Cette règle peut être exprimée comme suit :

$$N_2 \neq 2\,p\,3\,n$$

où n est un nombre entier quelconque.

3.- Le nombre d'encoches rotoriques doit aussi satisfaire l'inégalité :

$$N_2 \neq 6\,pn + 2p$$

sinon, il y a danger de patinage.

4.- Lorsque les nombres d'encoches statoriques et rotoriques s'approchent l'un de l'autre, ils ne doivent différer l'un de l'autre, ni par le nombre de paires de pôles, ni par le nombre de pôles :

$$N_2 \neq N_1 + p$$

$$N_2 \neq N_1 + 2p$$

D'autre part, lorsque le nombre d'encoches rotoriques est voisin de la moitié du nombre d'encoches statoriques, il ne doit différer de ce nombre par le nombre de paires de pôles :

$$N_2 \neq N_1/2 + p$$

De même lorsque le nombre d'encoches rotoriques est voisin du double du nombre d'encoches statoriques, il ne doit pas différer de ce nombre doublé par le nombre de pôles :

$$N_2 \neq 2\,N_1 + 2p$$

Si ces trois conditions ne sont pas satisfaites, on court le danger que le moteur tourne au ralenti à une vitesse instable.

5.- Le nombre d'encoches rotoriques augmenté ou diminué d'une unité, ne doit pas être multiple du nombre de pôles. Cela peut être exprimé par la condition :

$$N_2 \neq 6\,pn \pm 1$$

En outre, ce nombre doit aussi satisfaire l'inégalité :

$$N_2 \neq 6\,pn \pm (2\,p \pm 1)$$

Un moteur dont le nombre d'encoches rotoriques ne satisfait

pas à ces deux conditions, est sujet à la production de bruit d'origine magnétique. Il est à noter que ces deux inégalités déconseillent l'emploi du nombre d'encoches N_2 impair.

On peut parfois accepter la condition :

$$N_2 = N_1 - 2p$$

par exemple, pour les petits moteurs, mais de toute façon pour les grandes machines, cette combinaison est à éviter. On constate que les moteurs dont le nombre d'encoches respecte cette condition s'échauffent moins, mais par contre ils deviennent gênants au point de vue du bruit.

Exemple :

Le stator d'un moteur à 4 pôles a $N_1 = 36$ encoches et le rotor en a $N_2 = 42$ encoches. On demande de déterminer, si le moteur en question convient pour le rebobinage en moteur à 6 pôles.

La première condition est respectée, parce que le nombre d'encoches rotoriques n'est ni égal au nombre d'encoches statoriques, ni égal au nombre double d'encoches statoriques, ni égal à la moitié du nombre d'encoches statoriques.

La deuxième condition est respectée et pour $2p = 4$, parce que N_2 n'est pas divisible par $4 \times 3 + 12$ et pour $2_p = 6$ parce que N_2 n'est pas divisible par $6 \times 3 = 18$.

La troisième condition est respectée pour $2p = 4$ parce que 42 n'est pas multiple de 4. Mais pour $2p = 6$ cette condition n'est pas respectée vu que 42 est multiple de 6.

La quatrième condition est respectée seulement pour $2p = 4$ parce que :

$$N_1 + p = 36 + 2 = 38$$

$$N_1 + 2p = 36 + 4 = 40$$

et pour $2p = 6$:

$$N_1 + 2p = 36 + 6 = 42 = N_2$$

La cinquième condition est respectée pour les deux nombres parce que N_2 est pair.

On voit de cette façon que le rapport d'encoches donné n'est favorable que pour un moteur à quatre pôles. Quant au moteur à six pôles, il y a danger d'accrochage à vitesse réduite, suite à la non-observation des conditions 4 et 5, donc le circuit magnétique en question ne convient pas pour six pôles.

Exemple :

Examiner si le moteur ci-dessus convient pour le rebobinage à deux pôles.

La deuxième condition n'est pas respectée pour $2p = 2$, parce que le résultat de la division de $N_2 = 42$ par $2p = 2$ est multiple de 3 :

$$42 = 2 \times 21 = 2 \times 3 \times 7$$

La troisième condition est respectée pour autant que le résultat de la division de $N_2 = 42$ par $2p = 2$ ne peut pas être représenté par $3n + 1$.

Les chiffres les plus proches de cette valeur sont :

$$19 = 3 \times 6 + 1$$

$$22 = 3 \times 7 + 1$$

La quatrième condition ainsi que la cinquième est respectée.

Ainsi donc, le moteur en question ne convient pas pour le rebobinage à deux pôles puisqu'il y a danger de blocage à l'arrêt suite à la deuxième condition.

On peut parfois etre obligé à prendre le rapport d'encoches qui est défavorable au point de vue du bruit. Si après l'achèvement du moteur et lors de l'essai en plate-forme, on constate que le moteur a un bon cosφ et que le bruit cesse dès qu'on coupe le courant, on peut essayer de tourner le rotor pour diminuer son diamètre et augmenter ainsi l'entrefer de 0,2 à 0,3 mm environ. Cela peut faire disparaître le bruit des petits moteurs.

Chapitre 19

FORMULAIRE DE CALCUL

Il est très important de tenir les notes de calcul de toutes les modifications de rebobinage, si on désire que le calcul s'effectue sans interruption inopportune et dans un ordre bien déterminé. Cela pourrait en effet, rendre un service qui sera estimé ultérieurement lors du parcours de la grande quantité de feuilles de calcul, afin de recueillir des renseignements nécessaires, par exemple, en ce qui concerne la densité de courant adoptée dans divers cas.

Tout technicien peut élaborer un formulaire qui convient le mieux à son usage. Ci-dessous nous proposons une feuille de calcul suivant le tableau 30 qui peut être modifié d'après les besoins particuliers d'un atelier.

Ce formulaire présente toutes les grandeurs nécessaires pour le calcul d'un enroulement statorique rassemblées dans une suite logique d'utilisation. Il porte un titre et plusieurs rubriques de diverses destinations, ainsi qu'une rubrique pour des paraphes.

L'entête porte le nom de l'entreprise dans le coin supérieur gauche; le numéro de calcul et le numéro de la spécification de rebobinage dans le coin supérieur droit. Le milieu est réservé au titre et aux renseignements fondamentaux sur le moteur à rebobiner tels que : le nom du client, le nom du constructeur, le type du moteur, le numéro de fabrication, la protection du moteur et le genre de ventilation. Juste au-dessous se trouve la rubrique réservée aux caractéristiques mentionnées sur la plaque signalétique avant le rebobinage. La grandeur de ces dernières tels que la puissance, le courant statorique et le rendement n'est notée qu'après la fin du calcul.

Puis vient la rubrique réservée aux résultats du relevé des dimensions du circuit magnétique du stator ainsi que les grandeurs qui en découlent.

Encore plus bas à gauche, se trouve la rubrique prévue pour enregistrer les paramètres de la spécification d'enroulement sta-

NOM DE L'ENTREPRISE	REBOBINAGE DU MOTEUR ASYNCHRONE	CALCUL
	Type : Constructeur :	N° .....
	Numéro de fabrication : Protection :	
	Nom du client : Ventilation :	

Marques de la plaque signalétique	kW	tr/min	cosφ	Rendemt	Hz	Stator V	Stator A	Rotor V	Rotor A	REGIME
Avant rebobinage										
Après rebobinage										

Circuit magnétique du stator				Avant rebobinage	Après rebobinage			Avant rebobinage	Après rebobinage
	Diamètre extérieur en cm.		De			Epaisseur des tôles en mm.			
	Diamètre d'alésage en cm.		Da			Isolement des tôles			
	Longueur du fer avec canaux		Lf			Coefficient de foisonnement	k		
	Longueur du fer sans canaux		Lc			Hauteur de la couronne en cm.	Hc		
	Longueur de fer nette = Lc × k		Ln			Section couronne en cm2	Scs		
	Nombre d'encoches st/rt		N1/N2			Lr moyenne d'une dent en mm.	ld		
	Canaux transversaux	Nombre	nt			Nombre de pôles	2p		
		Largeur	l can			Arc polaire en cm.	τ		
	Canaux latéraux	Nombre	nc			Section d'entrefer en cm2	Se		
		Diamètre	dc			Section denture par pôle en cm2	Ss		

Spécification de l'enroulement statorique		Avant rebobinage	Après rebobinage
Type d'enroulement	–		
Nombre d'encoches par pôle et par phase			
Pas d'enroulement (1 à .....)	y		
Coefficient de bobinage	Kj		
Nombre de circuits en parallèle	n		
Schéma	N°		
Couplage des phases	–		
Poids de cuivre:net et employé	kg		

Choix du nombre de conducteurs suivant les inductions Note : Encadrer les nombres adoptés		Avant rebobinage	Variantes étudiées		
Nombre de conducteurs par encoche					
Nombre de spires en série par phase					
Flux par pôle	Φ = x10⁸				
Induction de l'entrefer	Φ/Se = /				
Induction de denture	Φ/Ss = /				
Induction couronne str:	Φ/Scs = /				

SECTIONS A FIL OU A BARRES		Avant rebobinage	Après rebobinage
Nature d'un fil ou d'une barre	–		
Isolement d'un fil ou d'une barre	–		
Diamètre nu en mm.	d		
Diamètre isolé en mm.	di		
Section d'un fil ou d'une barre	s		
Nombre de fils ou de barres par conducteur	n_1		
Section totale du conducteur	sc		
Longueur de la tête d'une section			
Longueur d'une spire moyenne	Sm		
Résistance d'une phase à 75°C	rc		
Courant par conducteur	A		
Section utile de l'encoche	Su		
Coefficient de remplissage	rm		
Densité de courant : A/mm2	δ		
Charge linaire : A/mm.	AC		
Coefficient d'échauffement	ACδ		
Jeu entre les têtes de sections en mm.	e_1		

CROQUIS DE L'ENCOCHE :

Calcul de l'encoche pour section à barres	Avant rebobinage Largeur	Avant rebobinage Hauteur	Après rebobinage Largeur	Après rebobinage Hauteur
Conducteur isolé				
Capotes				
Cales milieu				
Entremises				
Cale de fermeture				
Bec				
Jeu				
Total				

Têtes de sections	Avant rebobinage Largeur	Avant rebobinage Hauteur	Après rebobinage Largeur	Après rebobinage Hauteur
Isolement				
Gonflement dû à l'imprégnation				
Total				

CROQUIS DE L'ISOLEMENT D'ENCOCHE

Etabli par ..... le ..... 19 .....

Contrôlé par ..... le ..... 19 .....

La spécification de rebobinage N° ..... lancée le ..... 19 .....

TABLEAU 30

torique avant et après le rebobinage. En ce qui concerne le numéro du schéma d'enroulement, toute entreprise particulière peut facilement constituer une collection de schémas et les classer systématiquement.

Bien que le nombre de schémas divers qu'on utilise dans la pratique courante de rebobinage est assez grand, il n'est pas illimité. On constate même après une expérience relativement courte, qu'on retombe souvent sur les mêmes schémas pour un grand nombre de moteurs sans y apporter aucune modification, de sorte que de temps à autre, on n'a qu'à compléter sa collection par des nouveaux schémas non utilisés précédemment.

A droite de cette rubrique se trouve le calcul des inductions suivant le nombre de conducteurs choisi. On conseille de prendre note de toutes les variantes pour le contrôle et les modifications ultérieures.

La rubrique suivante, relative aux sections, est remplie après que le nombre de conducteurs par encoche est bien fixé. Cela permet d'établir le diamètre d'un fil ou d'une barre suivant la forme de l'encoche. Les autres données de cette rubrique permettent de déterminer la longueur de la spire moyenne, donc la résistance d'une phase, le poids du cuivre et finalement la puissance approximative du moteur.

Préalablement, il y a lieu de contrôler le remplissage d'encoche et le jeu dans le cas de l'enroulement à barres permettant de rétablir le calcul d'encoche primitive, si elle porte encore un enroulement primitif et effectuer le calcul de projet pour rebobinage en tenant compte des isolants disponibles.

A gauche il est prévu un espace libre destiné à recevoir un croquis d'encoche avec toutes ses dimensions côtées, telles qu'on les relève sur les moteurs à rebobiner.

L'espace en dessous est prévu pour un croquis d'isolement d'encoche et pour recevoir des renseignements concernant la composition des isolants d'encoche et des têtes de sections.

Une bande en bas du formulaire est réservée pour la date d'établissement du calcul et pour le paraphe de la personne qui l'a établi. Si cela est nécessaire on peut y ajouter une ligne pour le paraphe de la personne qui contrôle et approuve le calcul.

Aucun formulaire de calcul, quoiqu'il soit bien rédigé et présenté, quoiqu'il soit très commode, ne peut servir comme document pour l'exécution immédiate d'un enroulement.

En effet, pour une personne qui ne s'occupe pas de calcul, il n'est pas aisé d'extraire de tout cet amas de chiffres, les renseignements nécessaires à la préparation et à la mise en place correcte des sections d'enroulement. Donc, il est naturel de compléter le formulaire de calcul par une feuille séparée dénommée "la spécification de rebobinage", donnant un extrait bref du formulaire et ne contenant que les éléments strictement nécessaires à l'exécution de l'enroulement. Toutes ces feuilles de spécification d'enroulement doivent être numérotées et leurs numéros doivent être mentionnés sur le formulaire de calcul pour le classement et la réutilisation ultérieure.

L'en-tête de la spécification du rebobinage est le même que sur le formulaire de calcul. La feuille a deux colonnes : une pour stator, l'autre pour rotor (tableau 31).

Les six premières lignes sont extraites du formulaire de calcul et ne nécessitent aucun commentaire. En ce qui concerne les autres lignes, elles diffèrent des données du formulaire. Pour l'exécution de l'enroulement, il n'est pas essentiel de connaître comme c'est le cas pour le calcul, le nombre de spires en série par phase et le nombre de conducteurs par encoche.

Par contre, il est indiqué de mentionner le nombre de sections et le nombre de spires par section, ce qui fixe d'emblée l'importance de la composition d'enroulement .

En plus, il est d'une importance capitale, afin d'éviter toutes causes d'erreurs et d'ambiguité, d'exprimer la forme de la section du conducteur utilisé en toutes lettres, par exemple : *fil rond, barres, méplat.*

La dimension du conducteur du fil rond en cuivre nu ou isolé est généralement donnée en millimètres jusqu'au centième de millimètre près.

Quant aux conducteurs rectangulaires, leurs deux dimensions sont données par un produit de deux côtés, le petit côté avant le signe de multiplication et le grand côté après le signe de multiplication.

NOM DE L'ENTREPRISE	SPECIFICATION DE REBOBINAGE DU MOTEUR ASYNCHRONE	N°

Type du moteur :	Numéro de fabrication :
Nom du client :	Protection :
Constructeur :	Ventilation :

Marque de la plaque signalétique	kW	tr/min	Cos φ	Rendement	Hz	STATOR		ROTOR		REGIME
						Volt	Amp.	Volt	Amp.	
Avant rebobinage										
Après rebobinage										

DESIGNATION	STATOR	ROTOR
TYPE D'ENROULEMENT		
NOMBRE TOTAL D'ENCOCHES		
NOMBRE D'ENCOCHES PAR PÔLE ET PAR PHASE		
PAS D'ENROULEMENT		
COUPLAGE DES PHASES		
COUPLAGE DES BOBINES PAR PHASE		
SCHEMA D'ENROULEMENT		
NOMBRE TOTAL DE SECTIONS		
NOMBRE DE SPIRES PAR SECTION		
NOMBRE DE CONDUCTEURS		
NOMBRE DE { FILS / BARRES } PAR CONDUCTEUR		
DIMENSIONS DU CONDUCTEUR NU		
DIMENSIONS DU CONDUCTEUR ISOLE		
NATURE D'ISOLEMENT DU CONDUCTEUR		
SPIRE MOYENNE D'UNE SECTION		
RESISTANCE D'UNE PHASE A 75° C		
POIDS DU CUIVRE NET / EMPLOYE		
FORME DE ROULAGE		
NUMERO DE LA SPECIFICATION D'ISOLEMENT.		

OBSERVATIONS PARTICULIERES :

ETABLI SUIVANT LE CALCUL N°_____ par Mr_____ le _____ 19___

REMISE A L'EXECUTION _____ le _____ 19___

Tableau 31

La ligne"nature d'isolement du conducteur" est claire par soi-même et ne nécessite aucun commentaire, sinon qu'on peut toujours indiquer en abrégé le genre d'émail, le genre de guipage et le genre d'enrubannage.

Il est à conseiller de faire numéroter toutes les formes de roulage de section et d'élaborer un classement correspondant afin d'éviter de refaire une forme exécutée antérieurement.

Après un certain temps d'expérience, on constate, tout comme pour les schémas de bobinage, qu'on peut facilement trouver dans les formes utilisées, une qui peut encore servir pour un rebobinage nouveau. Le calculateur ayant les renseignements sur les formes sous la main peut facilement se rendre compte, d'après le tracé de la spire moyenne s'il existe une forme qui peut convenir.

En indiquant dans l'avant dernière ligne de la spécification de rebobinage le numéro de classement de cette forme, on rend un service appréciable au bobineur.

La dernière ligne de la spécification de rebobinage mentionne le numéro de la spécification d'isolement. Un atelier d'une certaine importance peut disposer, suite à une longue expérience, d'une normalisation type d'isolement pour les tensions, les classes d'isolement et les types des moteurs déterminés. Dans ce cas il n'est pas nécessaire d'énumérer toutes les opérations et de préciser l'isolement à préconiser; il suffit d'indiquer le numéro de cette spécification d'isolement.

Finalement l'espace à gauche est réservé aux remarques concernant l'isolement et le traitement de l'isolation dans chaque cas particulier.

ENROULEMENT STATORIQUE CONCENTRIQUE 5200 VOLTS - CLASSE B

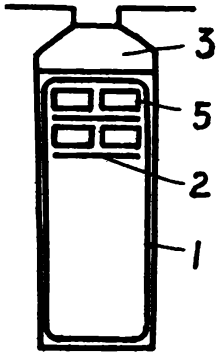
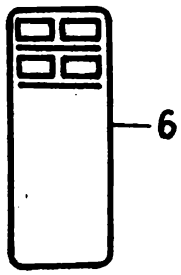
Isolement de l'encoche	Désignation	Largeur	Hauteur
	1. Capote en micafolium. Enduire l'extérieur de capotes d'une couche de peinture conductrice.	2 x 2,5 = 5,0	2,5 x 2 = 5,0
	2. Entremises entre les conducteurs en micanite de 0,25 mm pour "n" couches de conducteurs.	——	(n-1) x 0,25
	3. Cale de fermeture en bois traité.	——	5,0
	4. Jeu.	1,2	1,2
	5. Conducteur guipé en soie de verre vernie. Surépaisseur double de 0,6 mm.	2 x 0,6 = 1,2	n x 0,6
	Total :		
Isolement des têtes de bobines	6. 8 couches de ruban mica-papier-mica de 0,11 mm à demi-recouvrement plus une couche de ruban diagonal vernie de 0,2 mm à demi-recouvrement = surépaisseur simple totale de 2 mm. La distance des parties isolées sous tension à la masse doit être de 40 mm minimum. N.B. Bobines de choc doivent être isolées avec une surépaisseur de 0,8 mm donc le conducteur doit avoir 0,2 mm moins sur chacune de ses dimensions.	2 x 2 = 4	2 x 2 = 4
			

Tableau 32

ENROULEMENT STATORIQUE A ENCOCHES OUVERTES.

UN CONDUCTEUR EN LARGEUR.

ISOLEMENT DU CONDUCTEUR : 2 COUCHES DE COTON (CLASSE A).

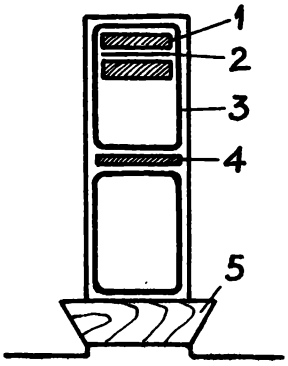
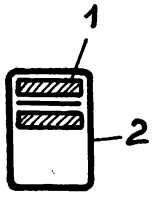
	Désignation	3150 ⅄ volts		6300 ⅄ volts	
		Largeur	Hauteur	Largeur	Hauteur
Isolement de l'encoche. 	1. Conducteurs isolés avec guipage de 2 couches de coton. (n=nombre de conducteurs en hauteur).	2 x 0,2=0,4	0,4 x n	2 x 0,2=0,4	0,4 x n
	2. Entremise en micafolium.	——	(n-1) x 0,2	——	(n-1) x 0,25
	3. Capote en micafolium.	1,4 x 2= 2,8	1,4 x 4=5,6	3,0 x 2 = 6	3 x 4 = 12
	4. Cale en cartogène.	——	3,0	——	5,5
	5. Cale d'encoche en bois dur traité.	——	3,0	——	5,0
	6. Jeu.	0,8	1,0	0,9	1,1
	Nota : les bobines de choc doivent être guipées avec 3 couches de coton, donc les dimensions de cuivre doivent être réduites de 0,2 mm.				
Isolement de têtes de bobines. 	1. Conducteur isolé.	0,2 x 2 =0,4	0,4 x n	2 x 0,2= 0,4	0,4 x n
	2. Capote : 3 couches de ruban huilé de 0,2 mm à demi-recouvrement.	1,7 x 2 =3,4	1,7 x 4 =6,8	2,8 x 2=5,6	2,8 x 4=11,2
	3. Jeu entre sections.	4	——	5,5	——
	Nota : La distance des parties isolées sous tension à la masse doit être de 15 mm minimum				

Tableau 33

ENROULEMENT ONDULE JUSQU'A 1300 VOLTS (Classe B)

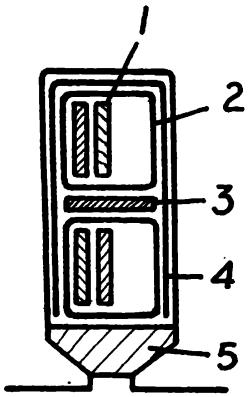
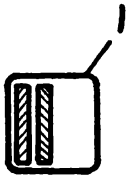
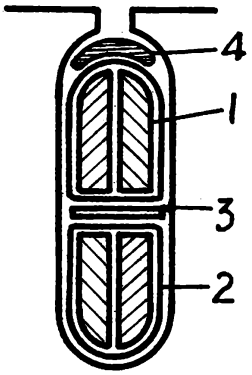
Isolement de l'encoche	Désignation	Largeur	Hauteur
	1. Conducteur non enrubanné.	———	———
	2. Capote en micafolium.	2 x 1,75 = 3,5	4 x 1,75 = 7,0
	3. Cale au milieu.	———	3,5
	4. Cavalier en carton.	0,2 x 2 = 0,4	0,2 x 1 = 0,2
	5. Cale de fermeture en micanite.	———	5,0
	6. Jeu.	1,0	1,6
	Total :		
Isolement des têtes de bobines. 	1. Deux couches de ruban soie-mica de 25 x 0,15 à demi-recouvrement plus deux couches de ruban en soie de verre diagonal vernie à demi-recouvrement.	0,2 x 1,2 = 2,4	2 x 1,2 = 2,4

Tableau 34

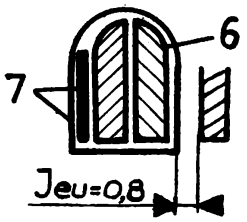
ENROULEMENT ROTORIQUE JUSQU'A 300 VOLTS - Classe B

Isolement de l'encoche.



Désignation	Largeur	Hauteur
1. Ruban soie de verre de 0,1 x 15 à demi-recouvrement.	0,1 x 8 = 0,8	0,1 x 8 = 0,8
2. Capote en micafolium de 0,2 mm (3 couches).	2 x 0,6 = 1,2	4 x 0,6 = 2,4
3. Intercalaire.	——	0,5
4. Cale.	——	1,0
5. Jeu.	0,8	0,8
Total :	2,8	5,5

Isolement des têtes de bobines.



6. Ruban en soie de verre de 0,1 x 1,5 à demi-recouvrement.	0,1 x 8 = 0,8	0,1 x 8 = 0,8
7. A l'endroit du changement des phases mettre un distanceur en cartogène de 1,5 mm sous un ruban de soie de verre supplémentaire.		
Total :		

Tableau 35

BIBLIOGRAPHIES

"Rebobinage des petits moteurs" par D.H. Braymer er A.C. Roé, 3ème édition Dunod, 1951.

"Rebobinage des moteurs d'induction" par D.H. Braymer et A.C. Roé, édition Dunod, 1953.

"La construction des bobinages électriques" par C. Clément, 4ième édition Dunod, 1952.

"Calcul de rebobinage" par G.K. Gervais, Gosenergoisdat, 1951.

Imprimé en Belgique
Sté An. Desoer
23629

A.C.E.C. Herstal	FEUILLE DE BOBINAGE N° _____	SERVICE : CE/FT Le _____

Nombre d'appareils _____ N° _____ Délai _____

Client _____ Imput. _____

_____ K.V.A. _____ Volts _____ Pér. _____ Connexions

_____ Phases _____ Amp. _____ Marche _____

Groupe de couplage _____

AUTO-TRANSFORMATEUR
REACTEUR
SELF

Fion _____

Type _____

Refroid.: Air – Huile

ENROULEMENTS	EXTERIEUR	INTERIEUR
Volts : entre, par phase		
Nombre de noyaux		
Nombre de noyaux bobinés		
Sens d'enroulement		
Nombre total de spires par noyau		
Nombre de bobines par noyau		
N° d'ordre des bobines, enroulement		
Nombre de spires par bobine		
Nombre de couches par bobine		
Nombre de spires par couche ou nombre de disques par bobine		
Dimensions du conducteur nu		
Arrangement des fils d'un conducteur		
Isolement des fils		
Dimensions du conducteur isolé		
Isolement du conducteur		
Poids du cuivre nu par transfor. Kg.		
Casier n°		
Isolement entre couches		
Isolement entre enroulements		
Hauteur de la bobine terminée		
Voltage d'essai		
Prises (La spire portant la prise est comptée à partir du commencement de la bobine, c'est-à-dire de l'entrée).	à la __ sp. de ____ bob.	à la __ sp. de ____ bob.

SCHEMA DES CONNEXIONS

N° _____

Ecran mm entre phases

Signature

(s)